

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»

На правах рукописи

БОЯРСКИЙ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ПЕРЕСЕЧЕНИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ВЫСОКИМ
ЗНАЧЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАГРУЗКИ ДВИЖЕНИЕМ**

**05.22.01 – «Транспортные и транспортно-технологические системы
страны, ее регионов и городов, организация производства
на транспорте»**

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Р.Н. Ковалев,
доктор технических наук,
профессор

Екатеринбург – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 4 |
| 1 Анализ исследований движения транспортных потоков на пересечении автомобильных дорог и критериев эффективности движения..... | 8 |
| 1.1 Классификация пересечений автомобильных дорог..... | 8 |
| 1.2 Анализ проблемы выбора критериев рационального типа пересечения автомобильных дорог..... | 10 |
| 1.3 Методы расчета задержки транспорта на пересечении..... | 22 |
| Выводы к главе 1..... | 27 |
| 2 Теоретическое обоснование общей модели определения транспортной задержки на пересечениях..... | 28 |
| 2.1 Общие положения теории транспортных потоков..... | 28 |
| 2.2 Моделирование транспортной задержки на пересечении в одном уровне..... | 34 |
| 2.3 Моделирование транспортной задержки на пересечениях в разных уровнях..... | 39 |
| 2.4 Моделирование транспортной задержки на регулируемом пересечении..... | 43 |
| Выводы к главе 2..... | 47 |
| 3 Обследование транспортных потоков в свердловской области и анализ полученных результатов..... | 49 |
| 3.1 Методика и результаты обследования регулируемых пересечений..... | 49 |
| 3.2 Определение значения граничного интервала..... | 60 |
| Выводы к главе 3..... | 62 |
| 4 Проведение имитационных экспериментов и анализ полученных результатов..... | 63 |
| 4.1 Методика проведения имитационных экспериментов..... | 63 |

| | |
|--|-----|
| 4.2 Результаты имитационного моделирования и их анализ..... | 66 |
| 4.3 Анализ результатов имитационного моделирования..... | 73 |
| 4.4 Построение итоговых зависимостей..... | 78 |
| 4.5 Исследование убывания очереди..... | 82 |
| 4.6 Предложения по совершенствованию методов определения задержки транспорта..... | 86 |
| 4.7 Оценка точности метода определения задержки транспорта..... | 89 |
| Выводы к главе 4..... | 92 |
| 5 Построение матрицы выбора типа пересечения автомобильных дорог..... | 94 |
| 5.1 Построение номограммы областей эффективного применения основных типов пересечений..... | 94 |
| 5.2 Формирование итоговой матрицы выбора типа пересечения автомобильных дорог..... | 96 |
| Выводы к главе 5..... | 97 |
| Заключение..... | 99 |
| Список литературы..... | 101 |
| Приложение А. Акт внедрения в учебный процесс..... | 114 |
| Приложение Б. Акт внедрения..... | 115 |
| Приложение В. Результаты имитационного моделирования..... | 116 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Для современных условий России характерны высокие темпы автомобилизации населения, приводящей к высокому уровню загрузки как улично-дорожной сети городов (УДС), так и сетей дорог общего пользования. В результате этого на территории крупных городов происходит исчерпание пропускной способности как самой УДС в целом, так и в ее узлах, представленных различными видами пересечений и развязок. Но существующая методическая и нормативная база страны, регулирующая методы и способы повышения эффективности организации дорожного движения на пересечениях УДС, была разработана для условий, не рассматривающих высокие значения коэффициента загрузки движением.

Анализ методической и нормативной литературы показывает, что действующие нормативы допускают неоднозначность в назначении типа пересечения и определения областей их эффективного применения. Это затрудняет решение проблемы повышения эффективности организации движения как в условиях высокой загрузки транспортными потоками, так и в условиях фактического исчерпания пропускной способности узлов УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования. Кроме того, изменения динамических характеристик подвижного состава автомобильного транспорта повлекло изменение целого ряда параметров транспортных потоков, которые нуждаются в уточнении.

Все это обуславливает актуальность исследований в области поиска методов повышения эффективности движения транспортных потоков при высоком значении коэффициента загрузки движением транспортной сети крупных городов страны. В этой связи данная работа направлена на повышение эффективности организации движения на основных типах пересечений УДС путем уточнения областей их эффективного применения.

Степень разработанности темы исследования. В России проблемой повышения эффективности функционирования транспортных потоков на пересечениях автомобильных дорог занимались такие ведущие ученые как Е.М. Лобанов,

В.А. Гохман, В.В. Столяров, А.Ю. Михайлов и др. В качестве основного критерия эффективности при решении данной задачи ими был принят критерий минимума приведенных затрат, который основывается на задержке транспорта на пересечении. При этом методы определения задержки транспорта, рекомендуемые действующей нормативной литературой в России, не учитывают ситуации, когда значение коэффициента загрузки движением для данного пересечения больше единицы.

Зарубежные руководства по оценке пропускной способности рассматривают такие ситуации, но постоянно совершенствуются, кроме того их применимость для отечественных условий при высоких значениях коэффициента загрузки движением не определялась.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности функционирования пересечений УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования в условиях высокого значения коэффициента загрузки движением на основе критерия минимума задержки транспорта.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Научно обосновать критерий оценки эффективности функционирования узлов улично-дорожной сети (УДС) и сетей автомобильных дорог общего пользования в условиях высокого уровня их загрузки.
2. Обосновать стохастическую дискретно-событийную модель, позволяющую оценивать задержки транспорта и длину очереди на основных типах пересечений и уточнить значения параметров, входящих в эти модели.
3. Определить рациональные области применения основных типов пересечений.
4. Предложить рекомендации по повышению эффективности функционирования пересечений УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования в условиях высокого значения коэффициента загрузки движением на основе уточнения выбора типа пересечения.

В качестве **методологии и методов исследования** в диссертационной работе используются: натурные наблюдения в производственных условиях, имитаци-

онное моделирование, статистический анализ и экспериментальные исследования транспортных потоков.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Научно обоснованы критерии оценки эффективности функционирования пересечений УДС в условиях высокого коэффициента загрузки движением.
2. Обоснована стохастическая дискретно-событийная модель, позволяющая оценивать задержки транспорта и длину очереди на основных типах пересечений УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования.
3. На основе сформулированных критериев определены рациональные области применения основных типов пересечений.

Теоретическая и практическая значимость работы. На основе разработанного метода расчета величины средней задержки транспорта при значениях коэффициента загрузки движением больше единицы определены условия эффективного применения различных типов пересечений автомобильных дорог, что при существующем уровне безопасности движения позволяет снизить задержку транспорта на пересечении.

Результаты работы используются на действующих пересечениях для определения потребности в реконструкции, параметров светофорного регулирования при величине загрузки движением больше единицы, выборе типа проектируемого пересечения.

На защиту выносятся положения:

1. Эффективность функционирования пересечений УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования в условиях высокой загрузки следует оценивать сочетанием критериев задержки и длины очереди.
2. Стохастическая дискретно-событийная модель позволяет оценивать задержки транспорта и длины очередей на основных типах пересечений.
3. Определение областей эффективного применения основных типов пересечений следует выполнять на основе критериев средней задержки и длины очереди.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов исследований и выводов диссертации обусловлена достаточной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований. Результаты натурных исследований проверены методами математической статистики с использованием современных компьютерных методик обработки, анализа и оценки достоверности данных.

Основные результаты работы представлены и одобрены: на всероссийских научно-технических конференциях студентов и аспирантов Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ, 2005–2013); научно-технической конференции, посвященной 55-летию Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС, 2011); XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящённой 60-летию Пермского национально-исследовательского технического университета по актуальным прикладным и фундаментальным вопросам экологии, строительства дорог и транспортных сооружений, транспорта и смежных наук (ПНИТУ, 2013). Кроме того, результаты работы обсуждались на научно-практическом семинаре «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов», проведенном с участием Администрации г. Перми, Института транспорта ПНИПУ и Центром дорожной информации (Пермь, 2013).

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ПЕРЕСЕЧЕНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ

1.1 Классификация пересечений автомобильных дорог

Узлы автомобильных дорог – это участки дорог, где возможен переход транспортных средств с одного направления на другое, при этом указывают следующие признаки классификации – количество подходящих к узлу направлений: четыре – пересечение, более четырех – звездообразные; три – примыкание; три и более, но углы пересечения малы и дороги разного значения – разветвление [21].

По числу уровней различают узлы в одном и многих уровнях.

Узлы автомобильных дорог в одном уровне подразделяются на следующие группы: простые узлы, не имеющие отдельных съездов для потоков движения, сворачивающих вправо и влево; с уширениями проезжих частей; с направляющими островками; кольцевого типа; с отдельными съездами, прочие, не вошедшие в рассмотренные выше группы; комбинированные.

Транспортные развязки, т.е. пересечения в двух и более уровнях, классифицируют по следующим признакам:

1) по конструкции: развязки, имеющие в основе элементы клеверного листа; развязки, имеющие в основе элементы кольца; развязки с параллельным расположением правоповоротных и левоповоротных съездов; развязки, на которых пересекающиеся дороги разделяются на отдельные ветви; прочие типы развязок, не указанные выше; комбинированные развязки.

2) по способу осуществления левоповоротного движения различают: развязки, на которых левоповоротное движение во всех направлениях совершается путем непосредственного поворота влево; развязки, на которых левоповоротное движение во всех направлениях совершается путем поворота вправо и влево; развязки, на которых левоповоротное движение в одних направлениях совершается путем поворота вправо, а в других – вправо и влево [74, 77, 78, 82–84].

Также различают полные и неполные транспортные развязки, в которых:

- а) отсутствуют точки пересечения транспортных потоков в одном уровне (полные транспортные развязки),
- б) имеются точки пересечения транспортных потоков в одном уровне на второстепенном направлении (неполные транспортные развязки),
- в) имеются точки пересечения транспортных потоков в одном уровне на основных направлениях (простые узлы).

В России общеприняты следующие варианты организации движения на пересечениях автомобильных дорог по мере роста интенсивности движения [43; 44, 88, 89, 90, 95].

1. Необорудованное пересечение в одном уровне.
2. Канализированное пересечение (кольцевое пересечение).
3. Разделение прямых потоков автомобилей с помощью путепровода, устройство правоповоротных съездов с переходно-скоростными полосами (а также пересечения типа «ромб»).
4. Пересечения «клеверный лист» полного и неполного типов с переходно-скоростными полосами.
5. Разделение взаимодействующих левоповоротных потоков, устройство прямых и полупрямых левоповоротных съездов с переходно-скоростными полосами.

Для достижения поставленной в диссертационном исследовании цели было проведено сравнение наиболее распространенных типовых вариантов. Требования к типовым вариантам определяются следующей нормативной литературой: типовые материалы для проектирования 503-0-51.89 «Пересечения и примыкания автомобильных дорог в одном уровне» [66]; ВСН 103–74 «Технические указания по проектированию пересечений и примыканий автомобильных дорог» [103]; ОДМ 218.6.003–2011 «Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах» [53]; ОДМ 218.4.005–2010 «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [52].

Укрупненные нормативы цены строительства выделяют транспортные развязки «неполный клеверный лист», «клеверный лист» и «труба»; эти транспортные развязки являются наиболее распространенными и типовыми.

1.2 Анализ проблемы выбора критериев рационального типа пересечения автомобильных дорог

Для выбора рационального типа пересечения автомобильных дорог в разное время предлагались и применялись на практике критерии: пропускная способность пересечения, величина транспортной задержки на пересечении, а также занимаемая площадь и безопасность движения (в условиях городской застройки) [4–6, 100].

По рассматриваемой проблеме был предложен подход, основанный на анализе пропускной способности и безопасности движения на пересечениях [125]. В результате разработана диаграмма применимости различных видов планировочных решений и приведены рекомендации по их оборудованию:

устройство островков является необязательным при интенсивности движения на второстепенной дороге менее 500 авт./сут и малой доле поворачивающих автомобилей на главной дороге;

при интенсивности движения свыше 500 авт./сут как по главному, так и по второстепенному направлению и благоприятных условиях движения, рекомендуется произвести разметку проезжей части главного направления и выделить островки на второстепенном направлении;

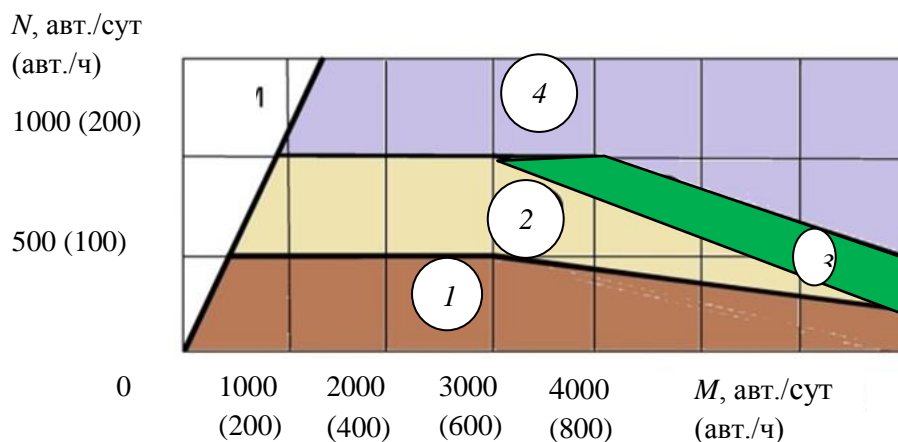
левоповоротные полосы, как и направляющие островки, добавляются на главной дороге в благоприятных условиях движения при интенсивности второстепенного направления свыше 1750 авт./сут и свыше 1000 авт./сут в неблагоприятных условиях;

главное направление определяется по интенсивности движения.

В неблагоприятных условиях при интенсивности движения по второстепенному направлению свыше 500–1000 авт./сут и свыше 800–1750 авт./сут в бла-

гоприятных необходимо либо обустройство пересечения в разных уровнях, либо организация светофорного регулирования. (рисунок 1.1).

а)



б)

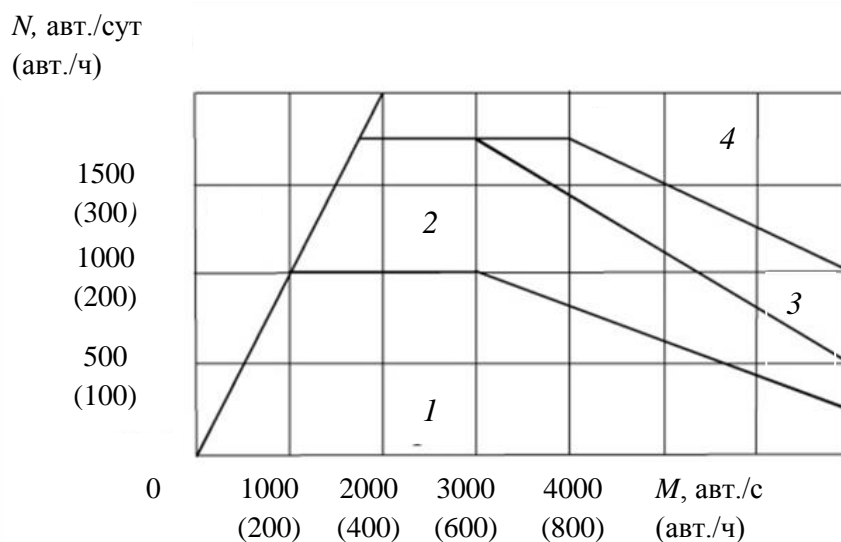


Рисунок 1.1 – Рекомендуемые области применения планировочных решений пересечений (для условий ФРГ)

а – благоприятные условия; *б* – неблагоприятные условия

1 – необорудованные пересечения *2* – каплеобразные островки на второстепенной дороге;

3 – канализирование движения; *4* – транспортные развязки в разных уровнях

Для оценки существующей или проектируемой планировки узла необходимо знание таких показателей, как возможное количество автомобилей в очереди на второстепенной дороге и потери времени транспортным потоком на пересекающихся дорогах [72].

Границы применимости различных типов планировочных решений определяются на основании срока окупаемости затрат [1, 72, 103, 105]:

$$\frac{C_2 - C_1}{c_t (T_{w2} - T_{w1})} \leq \text{срок окупаемости}, \quad (1.1)$$

где C_1 и C_2 – сметная стоимость строительства и стоимость эксплуатационных расходов сравниваемых вариантов; $c_t T_{w2}$ и $c_t T_{w1}$ – стоимости потерь времени на сравниваемых вариантах.

В итоге был полученный результат представлен на рисунке 1.2.

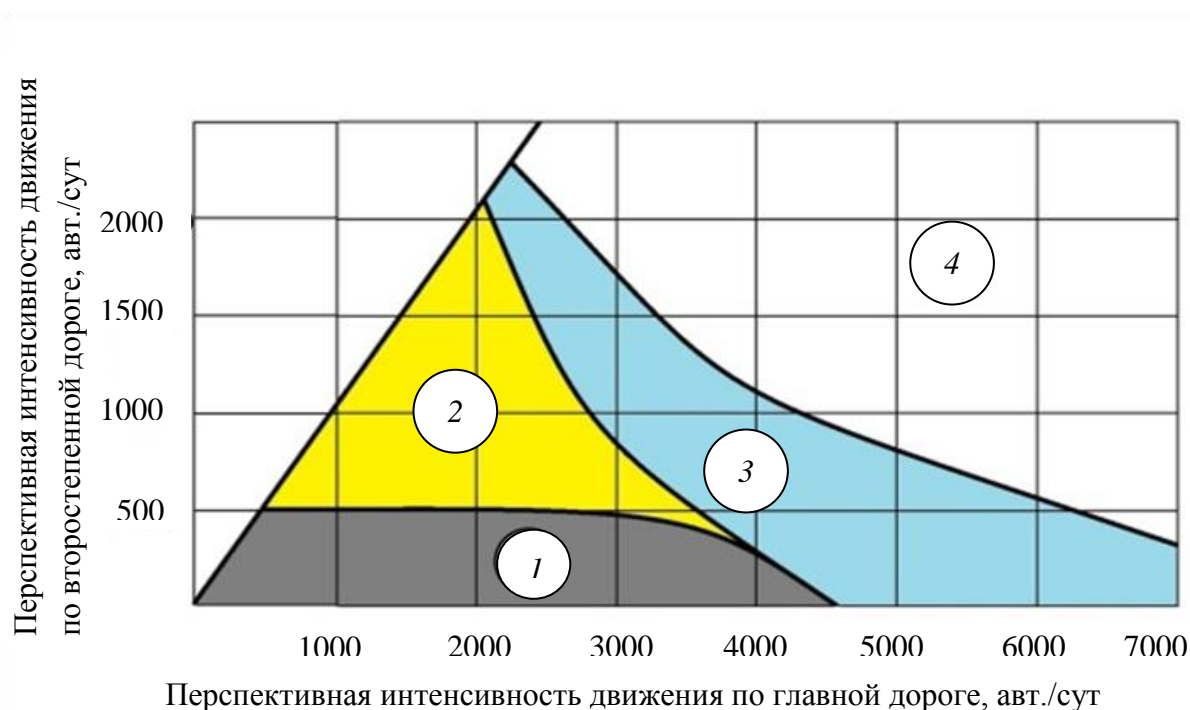


Рисунок 1.2 – Область применения различных типов узлов; левые повороты по обеим дорогам – 29 %

1 – область применимости необорудованных транспортных узлов; 2 – частично канализованные транспортные узлы с направляющими островками на второстепенной дороге и увеличенными радиусами правоповоротных съездов; 3 – канализованные транспортные узлы в одном уровне с направляющими островками на второстепенной и главной дорогах, с большими радиусами съездов и переходно-скоростными полосами, расположенными на главной дороге; 4 – транспортные развязки в разных уровнях

Предельные соотношения интенсивностей движения на пересекающихся дорогах, при которых целесообразно применение транспортных узлов в одном

уровне, несколько ниже, чем пропускная способность этих узлов. Предполагается, что при интенсивности движения, близкой к практической пропускной способности, потери времени автомобилями достигают такой величины, что переход от пересечения в одном уровне к транспортной развязке в нескольких уровнях экономически целесообразен еще до достижения предельно возможных интенсивностей движения на обеих дорогах.

Такой подход в дальнейшем получил развитие в ВСН 25–86 «Указания по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах.» [105] (рисунок 1.3).

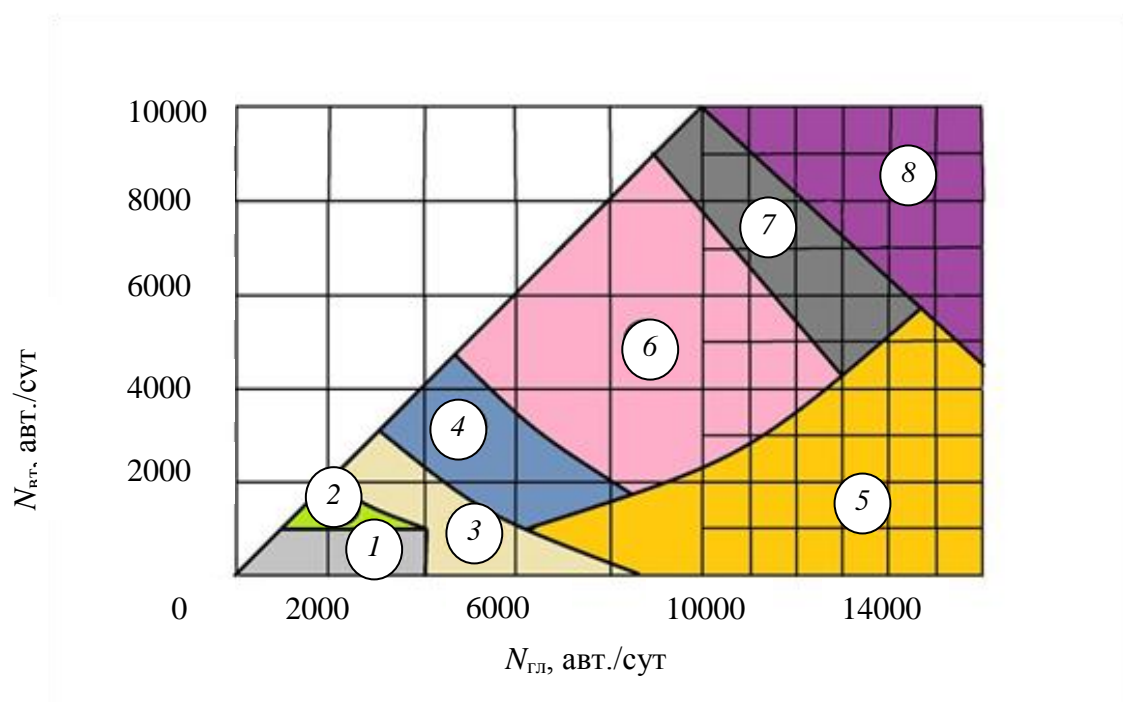


Рисунок 1.3 – Номограмма для выбора типа планировочных решений пересечений $N_{вт}$ – перспективная интенсивность движения по второстепенной (менее загруженной) дороге, авт./сут; $N_{гл}$ – перспективная интенсивность движения по главной (более загруженной) дороге, авт./сут; 1 – простое необорудованное пересечение, 2 – частично канализованные пересечения с направляющими островками на второстепенной дороге, 3 – полностью канализованные пересечения и примыкания с направляющими островками на обеих дорогах, переходно-скоростными полосами, разметкой проезжей части; 4 – конкурирующие варианты кольцевых пересечений; 5 – конкурирующие варианты: кольцевые пересечения, в разных уровнях и варианты стадийного строительства; 6 – конкурирующие варианты пересечений: кольцевые с малыми центральными островками и стадийное развитие; 7 – конкурирующие планировочные решения: стадийное развитие и в разных уровнях; 8 – пересечения в разных уровнях

В дальнейшем схема, представленная на рисунке 1.3, без изменений принята для «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах.» [77].

Окончательный вариант планировки пересечения должен выбираться на основе технико-экономического расчета величины суммарных приведенных затрат с учетом строительной стоимости пересечения, затрат на его ремонт и содержание, эксплуатационных и автотранспортных расходов по каждому варианту, потерь народного хозяйства от ДТП и изъятия земельных угодий.

Еще один вариант выбора типа пересечений представлен в [76] (рисунок 1.4).

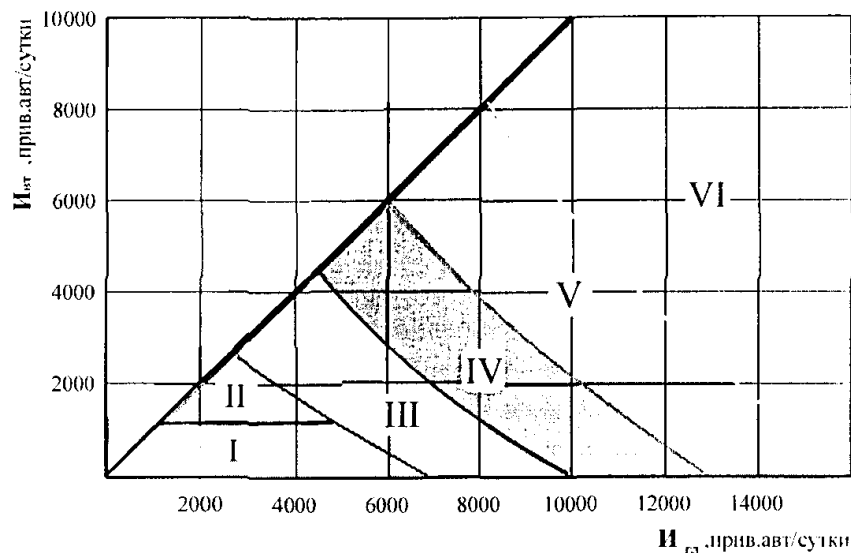


Рисунок 1.4 – Номограмма для предварительного выбора вариантов планировочных решений пересечений

$I_{вт}$ – перспективная интенсивность движения по второстепенной (менее загруженной) дороге, прив. авт./сут; $I_{гл}$ – перспективная интенсивность движения по главной (более загруженной дороге), прив. авт./сут; I – простое необорудованное пересечение; II – частично канализированные пересечения и примыкания с направляющими островками на второстепенной дороге; III – полностью канализированные пересечения и примыкания с направляющими островками на обеих дорогах, переходно-скоростными полосами; IV – конкурирующие варианты кольцевых пересечений VI – пересечения в разных уровнях

Варианты конкурирующих пересечений представлены в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Конкурирующие варианты типов пересечений [76]

| Категории пересекающихся дорог | | Тип | |
|--------------------------------|-----------------|---|--|
| Главная | Второстепенная | пересечений | примыканий |
| IA | Все категории | Пересечения в разных уровнях | Примыкания в разных уровнях |
| IB | Все категории | | Канализированные в одном уровне только с правым поворотом |
| IV | IV, II, III, IV | Пересечения в разных уровнях, канализированные пересечения со светофорным регулированием | При разрешенном левом повороте – канализированные, со светофорным регулированием, при разрешении только правого поворота – нерегулируемые, с канализированием движения на примыкающей дороге |
| | V | – | Разрешен только правый поворот, канализирование движения только на примыкающей дороге |
| II | II, III, IV | При уровне загрузки главной дороги менее 0,2 – канализированные, нерегулируемые, при уровне загрузки 0,2 и более – пересечения в разных уровнях полные, неполные, прокол; пересечения в одном уровне со светофорным регулированием или кольцевое пересечение | |
| | V | Частично канализированные нерегулируемые, с разделительными островками только на второстепенной дороге | |
| III | III | В соответствии с требованиями действующих нормативов, при суммарной интенсивности движения на пересекающихся или примыкающих дорог более 8000 приведенных авт./сут – пересечения в разных уровнях | |
| III | III, IV | Канализированные: при уровне загрузки главной дороги менее 0,15 – нерегулируемые; при уровне загрузки 0,15 и более – со светофорным регулированием или кольцевое пересечение. При уровне загрузки второстепенной дороги менее 0,1 – частично канализированные нерегулируемые, с разделительными островками только на второстепенной дороге | Канализированные: при уровне загрузки главной дороги менее 0,2 – нерегулируемые, при уровне загрузки 0,2 и более – со светофорным регулированием. При уровне загрузки второстепенной дороги менее 0,15 – частично канализированные нерегулируемые, с разделительными островками только на второстепенной дороге |
| | V | Необорудованные (простые); при уровне загрузки движением главной дороги 0,3 и более разрешен только правый поворот | |

Окончание таблицы 1.1

| Категории пересекающихся дорог | | Тип | |
|--------------------------------|----------------|--|--|
| Главная | Второстепенная | пересечений | примыканий |
| IV | IV | Канализированные нерегулируемые при уровне загрузки главной дороги более 0,15 Светофорное регулирование или кольцевое пересечение при уровне загрузки главной дороги более 0,3 и второстепенной дороги более 0,2 Частично канализированные при уровне загрузки второстепенной дороги менее 0,1 | Канализированные; при уровне загрузки главной дороги менее 0,2 – нерегулируемые, при уровне загрузки 0,2 и более – со светофорным регулированием |
| | V | Необорудованные (простые); при уровне загрузки движением главной дороги 0,3 и более разрешен только правый поворот | |
| V | V | Необорудованные (простые) | |

Окончательный выбор вариантов осуществляется по их технико-экономическому сравнению.

Для определения области применения транспортных развязок также использует критерий минимальной суммы приведённых затрат. Он же указывает на отсутствие методики определения скоростей движения потока автомобилей по различным элементам транспортных развязок, что влияет на точность определения эксплуатационных автотранспортных расходов, которые составляют наибольшую часть суммарных приведённых затрат [97–100].

Определение целесообразности реконструкции или принятия к строительству одного из нескольких вариантов связано с установлением экономии средств от уменьшения транспортных потерь на новой развязке и дополнительных капиталовложений в ее строительство [114].

По сравнению с пересечениями в одном уровне транспортные развязки способны обеспечить непрерывность движения и более высокие скорости как поворачивающих автомобилей, так и автомобилей прямых направлений. Однако в зависимости от характера выполнения левых поворотов и условий вливания в основной поток эти преимущества транспортных развязок могут проявиться в разной степени.

Устройство на развязке правоповоротных съездов требует дополнительных капиталовложений, но позволяет устранить пересечения наиболее интенсивных транспортных потоков прямых направлений. Границы применимости различных типов съездов представлены на рисунках 1.5–1.7.

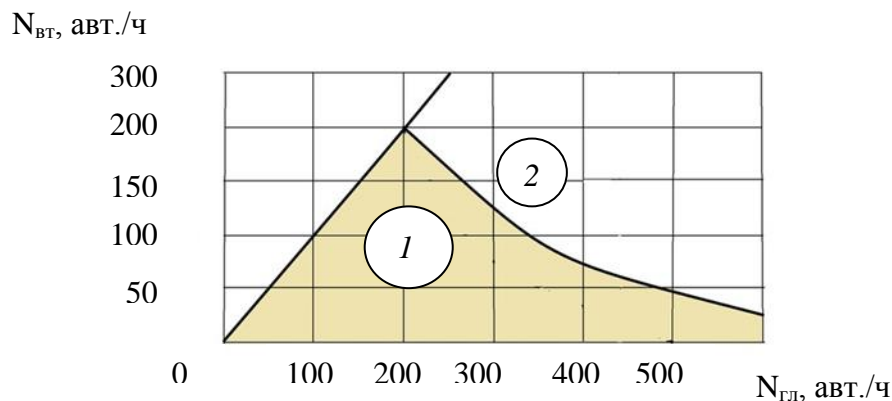


Рисунок 1.5 – Условия перехода к неполной транспортной развязке
1 – канализированное пересечение в одном уровне; 2 – пересечения типа «ромб»

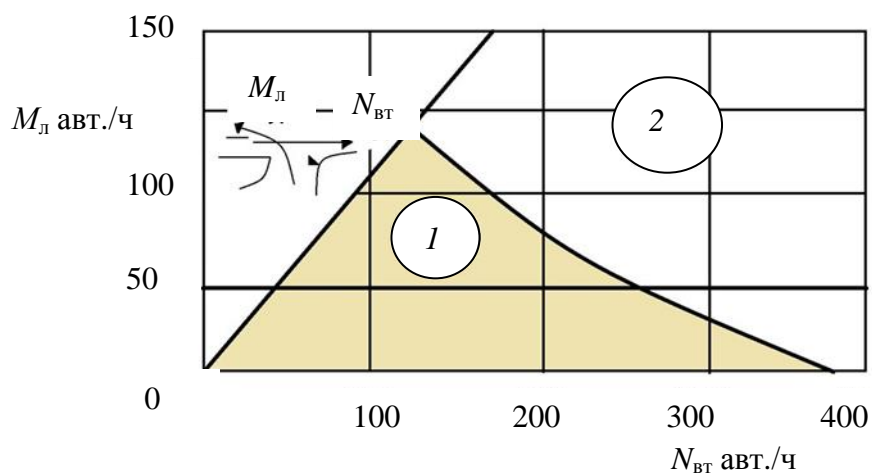


Рисунок 1.6 – Диаграмма применимости левоповоротного съезда пересечения «клеверный лист», не имеющего переходно-скоростных полос
1 – левоповоротный съезд канализированного пересечения в одном уровне; 2 – левоповоротный съезд пересечения «клеверный лист» без полос торможения и разгона

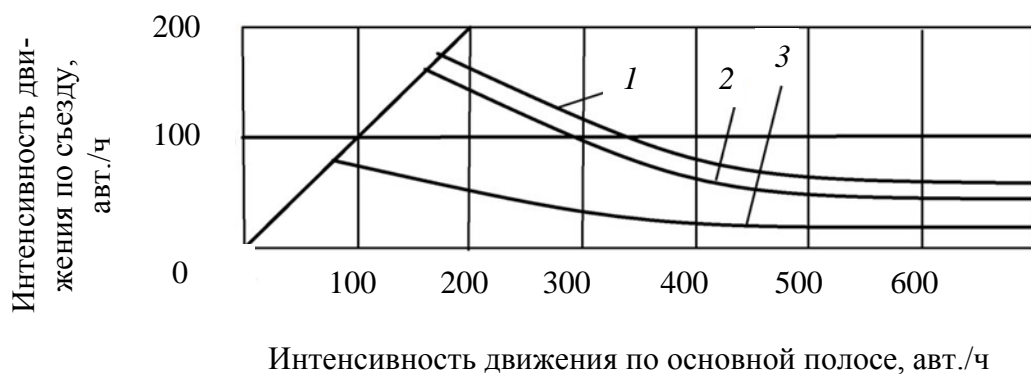


Рисунок 1.7 – Диаграмма применимости различных типов съездов с переходно-скоростными полосами

1 – переходно-скоростные полосы левоповоротного съезда пересечения «клеверный лист»;
 2 – переходно-скоростные полосы с разделительной полосой левоповоротного съезда пересечения «клеверный лист»; 3 – переходно-скоростные полосы с разделительной полосой левоповоротных съездов

Эффективность устройства пересечения типа «ромб» следует сравнивать с эффективностью канализированных пересечений как наиболее совершенных типов пересечений в одном уровне. Устройство таких развязок не исключает задержек автомобилей при выполнении левых поворотов, которые совершаются на участке второстепенной дороги с примыкающими к нему правоповоротными съездами развязки [114].

Одним из возможных решений устранения наиболее загруженного левого поворота на этом примыкании является устройство петли левоповоротного съезда развязки «клеверный лист».

Диаграммы применимости петли левоповоротного съезда показаны на рисунке 1.8. Устройство полос разгона для левоповоротного съезда связано с уширением путепровода, земляного полотна и проезжей части, требующих довольно больших дополнительных капиталовложений. В связи с этим строительство полос разгона для правоповоротных съездов, требующих меньших затрат, эффективно для более низких соотношений интенсивностей.

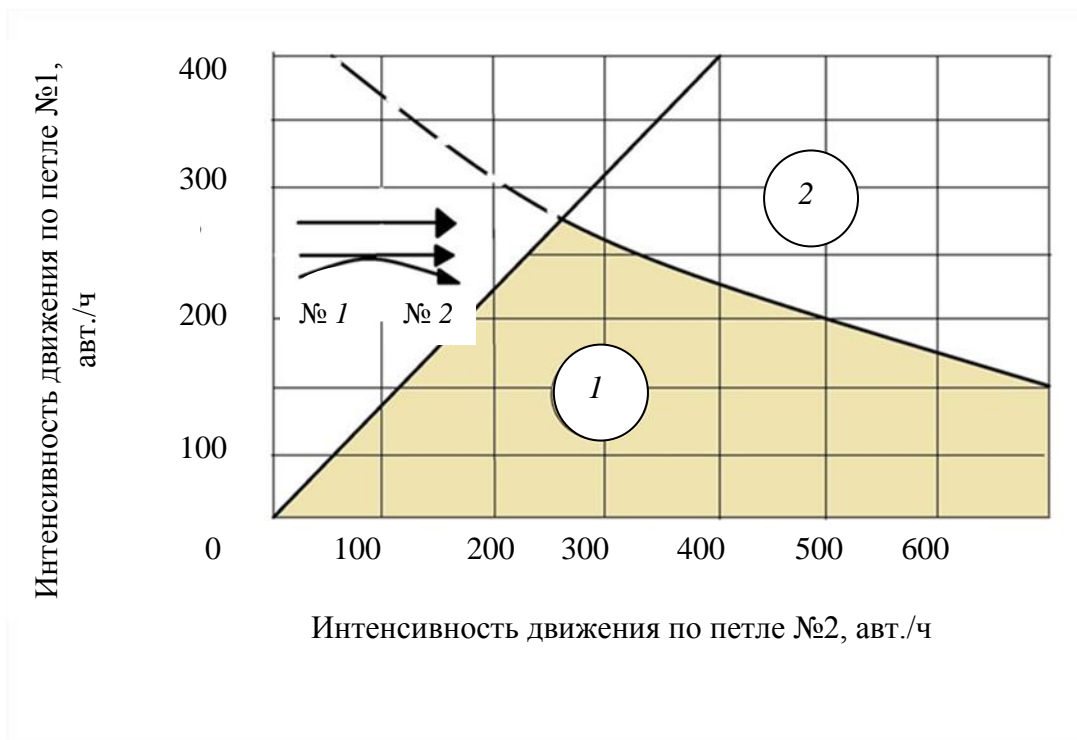


Рисунок 1.8 – Диаграмма применимости полупрямых левоповоротных съездов

1 – левоповоротный съезд пересечения клеверный лист;

2 – полупрямой левоповоротный съезд

На полных пересечениях «клеверный лист», на которых переходноскоростные полосы отделены от главной дороги, вливание автомобилей, выходящих с петель съездов, происходит в левоповоротном потоке смежной петли. В связи с тем, что на подобных развязках устранены помехи движению автомобилей основного направления, область применимости их довольно обширна. Однако с ростом интенсивности левоповоротных потоков на пересекающихся дорогах появляется необходимость исключения их взаимодействия, чего можно добиться заменой петли прямым или полупрямым левоповоротным съездом.

Анализируя данную работу [114] необходимо учитывать, что расчёты выполнены с использованием параметров режимов движения потоков автомобилей на дороге с четырьмя полосами движения и только для случая, когда переходноскоростные полосы отсутствуют.

Преимущества и недостатки применения кольцевых пересечений указаны в [68]. Здесь считается, что кольцевые пересечения целесообразно применять при: пересечении более пяти направлений; интенсивность движения транспорта должна быть не выше определённых значений; отсутствии трамвайного транспорта; наличия свободной территории;

Также в качестве фактора, влияющего на транспортную задержку, рассмотрена схема организации движения на узле.

Путем сравнения компактного кольцевого пересечения и нерегулируемого пересечения устанавливается [42]: компактные кольца обладают большей суммарной пропускной способностью при всех значениях интенсивностей пересекающихся транспортных; нерегулируемые пересечения обладают меньшей суммарной задержкой при высокой неравномерности движения на подходе к перекрестку и в обратном направлении; по критерию суммарной задержки, нерегулируемые перекрестки предпочтительнее компактного кольцевого пересечения, в случае, превышения доли прямого потока на главном направлении 60% и, когда доля прямого потока на второстепенном направлении меньше 40%, данное преимущество действует до суммарной интенсивности движения 2200 авт./ч; с ростом доли связанной части потока значительно возрастают суммарные задержки, поэтому не рекомендуется размещать компактные кольцевые пересечения вблизи от регулируемых пересечений.

В соответствии с полученными в работе [42] результатами рекомендуемая область применения компактных кольцевых пересечений – это участки двухполосных магистральных улиц районного значения и местных улиц, удаленные от регулируемых пересечений на 600–700 м и имеющие неравномерность движения в прямом и обратном направлениях не более чем 9:1. При этом рекомендуется применять компактные кольцевые пересечения при суммарной интенсивности движения не более 2200–2300 авт./ч.

В качестве критерия оптимальности управления на отдельном регулируемом пересечении большое распространение получила величина средней задержки регулирования [41]. Здесь необходимо понимать, что величина задержки

транспорта тесно связана с такими параметрами, как длина очереди, интенсивность движения, пропускная способность, параметры режима регулирования (рисунок 1.9).

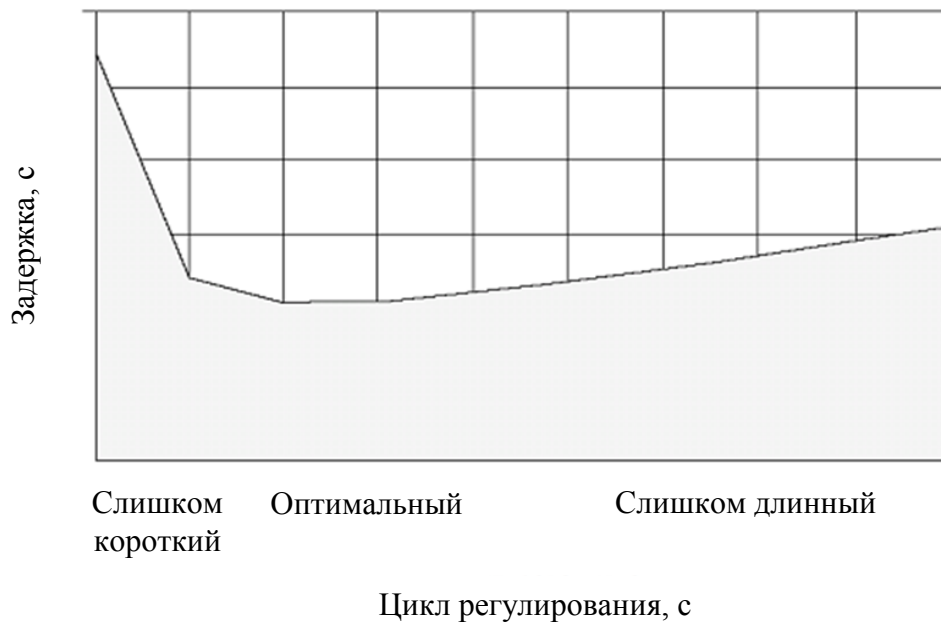


Рисунок 1.9 – Общий вид зависимости между задержкой транспорта и циклом регулирования светофора

Также для определения области применения регулируемых пересечений используют схему, представленную на рисунке 1.10.

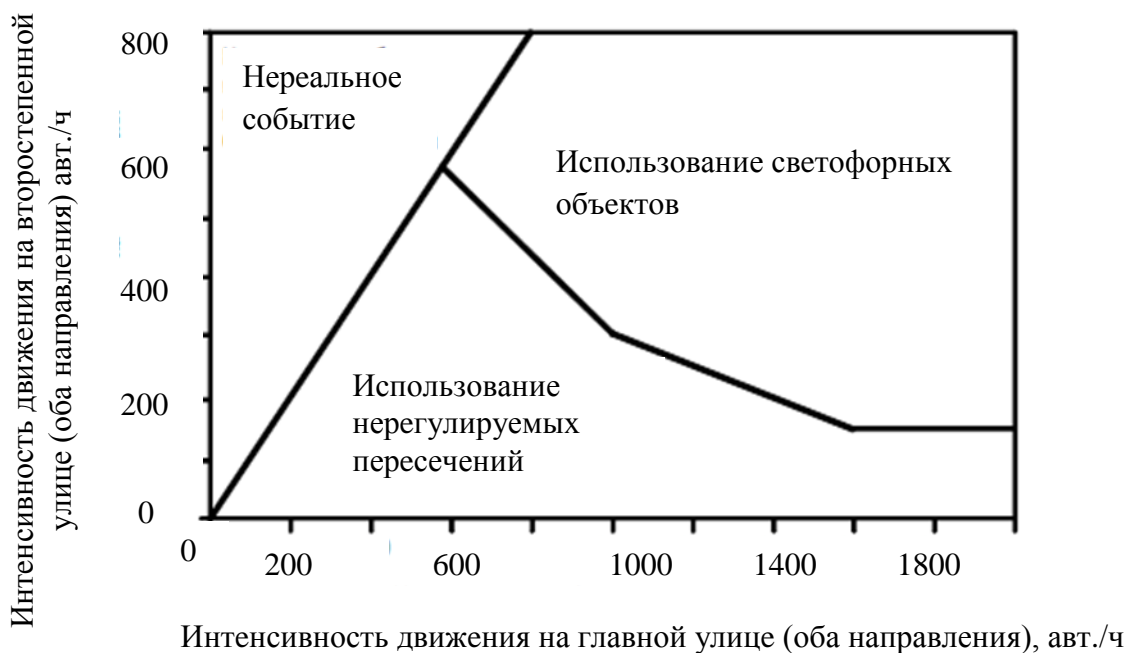


Рисунок 1.10 – Применение различных типов пересечений

Таким образом, из анализа работ отечественных и зарубежных авторов очевидно, что основным критерием выбора рационального типа пересечения автомобильных дорог в настоящее время является показатель экономической эффективности в виде минимума приведённых затрат на его строительство, содержание и эксплуатацию. Также очевидно, что величина данного показателя в значительной степени зависит от величины потерь времени транспортом при простоях на пересечении. Поэтому в качестве основного критерия оптимальности в диссертации предложен показатель минимума потери времени транспортом на пересечении.

1.3 Методы расчета задержки транспорта на пересечении

Применительно к транспортным узлам автомобильных дорог теоретическая пропускная способность узла определяется предельным соотношением интенсивностей движения пересекающихся дорог. Так как на практике применяются не все интервалы в транспортном потоке на главной дороге, часто используют термин «возможная пропускная способность», который характеризует максимальную интенсивность второстепенной дороги (N_{\max}) при заданной интенсивности главной дороги (N) с учетом реальных условий движения при полном использовании всех интервалов главного потока. Следовательно, коэффициент загрузки движением для нерегулируемого пересечения будет выглядеть следующим образом:

$$z = \frac{N}{N_{\max}}. \quad (1.2)$$

Снижение скоростей движения и возникновение очередей ожидающих автомобилей приводит к появлению задержки транспорта на пересечении. В общем случае она определяется как [38, 107, 108, 110, 112]:

$$t_3 = t_0 + t_{\Pi} + t_{\text{оч}} + t_{\text{тр}}, \quad (1.3)$$

где t_0 – потери времени из-за снижения скорости автомобилей основного направления; t_{Π} – потери времени из-за перепробегов; $t_{\text{оч}}$ – потери времени из-за образования очереди; $t_{\text{тр}}$ – потери времени при разгоне и последующей остановке.

Наибольшее влияние на задержку транспорта с ростом интенсивности движения оказывает величина $t_{оч}$. Сама же очередь на пересечениях возникает по причине ожидания приемлемого для осуществления маневра интервала (нерегулируемые пересечения) и ожидания разрешающего сигнала светофора (регулируемые). Это и обуславливает различия в подходах к определению задержки транспорта.

Для нерегулируемых пересечений и съездов с транспортных развязок используют метод, основанный на последовательном определении вероятности образования очереди из 0, 1, 2, 3 ... n автомобилей при различных соотношениях интенсивности на второстепенной и главной дорогах [45]. Средние потери времени на ожидание в очереди определяются по формуле

$$t_{оч} = \sum_{n=1}^{\infty} np_n, \quad (1.4)$$

где n – количество автомобилей в очереди; p_n – вероятность образования очереди из n автомобилей.

Для регулируемых пересечений наибольшее распространение получила формула Вебстера [36]:

$$t_{оч} = \frac{T_{ц}(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2N(1-x)} - 0,65 \left(\frac{T_{ц}}{N^2} \right)^{1/3} x^{(2+5\lambda)}, \quad (1.5)$$

где λ – отношение длительности разрешающего сигнала к циклу $\left(\lambda = \frac{t_p}{T_{ц}} \right)$; N – интенсивность движения транспортных средств в рассматриваемом направлении, ед./с; x – степень насыщения потока.

Первая составляющая позволяет определить задержку при регулярном прибытии автомобилей к пересечению, вторая учитывает случайный характер прибытия, третья является корректирующим членом.

Однако, как показала практика, формула Вебстера эффективно работает при коэффициенте загрузки движением до 0,8; при больших значениях расхождения очень существенны [41].

В свою очередь, руководства по оценке пропускной способности зарубежных стран (HCM1994, CCG 1995, HCM 2000) предлагают свои методы по оценке средней задержки транспорта на пересечении.

Так, HCM1994 [41] рекомендует одну из формул для определения задержки транспорта на регулируемом пересечении с учетом местных условий [41]:

$$d = d_1(CF - DF) + d_2, \quad (1.6)$$

$$d_1 = 0,38C \frac{\left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{\left(1 - \frac{g}{C} X\right)}, \quad (1.7)$$

$$d_2 = 137X^2 \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1) \frac{m}{c} X} \right], \quad (1.8)$$

где d – транспортная задержка на один автомобиль, с/прив.ед.; d_1 – стандартная задержка, предполагающая одинаково повторяющееся прибытие автомобилей к перекрестку, с/прив.ед.; d_2 – дополнительная задержка, учитывающая случайность прибытия транспортных средств, при этом, предполагается, что величина начальной очереди автомобилей равна нулю, с/прив.ед.; DF – коэффициент, учитывающий тип регулирования и качество прогрессии; CF – коэффициент, учитывающий тип регулирования; X – уровень загрузки на полосе (в группе движения); C – длительность цикла регулирования, с; c – пропускная способность полосы (группы движения), прив. ед./ч; g – эффективное зеленое время для рассматриваемой группы движения, с; m – коэффициент, учитывающий тип прибытия и образование пачек в транспортном потоке (для случайного прибытия $m = 16$).

В CCG 1995 [41] используется следующая формула:

$$d = d_1 k_f + d_2, \quad (1.9)$$

$$d_1 = 0,5C \frac{\left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \frac{g}{C} \min(X; 1,0)}, \quad (1.10)$$

$$d_2 = 15t_e \left[(X - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{240}{Ct_e}} \right], \quad (1.11)$$

$$k_f = \frac{\left(1 - \frac{q_{gr}}{q}\right) f_p}{1 - \frac{g}{C}}, \quad (1.13)$$

где d – транспортная задержка на один автомобиль, с/прив. ед.; d_1 – стандартная задержка, предполагающая одинаково повторяющееся прибытие автомобилей к перекрестку, с/прив. ед.; d_2 – дополнительная задержка, учитывающая случайность прибытия транспортных средств, при этом предполагается, что величина начальной очереди автомобилей равна нулю, с/прив. ед.; k_f – коэффициент, учитывающий качество прогрессии; C – длительность цикла регулирования, с; G – эффективное зеленое время для рассматриваемой группы движения, с; X – уровень загрузки на полосе (в группе движения); t_e – период обследования, мин; q_{gr} – интенсивность прибытия на полосе (в группе движения) в течение зеленого сигнала, прив. ед./ч; q – общая интенсивность прибытия на полосе (в группе движения), прив. ед./ч; f_p – коэффициент, учитывающий тип прибытия и образование пакетов в транспортном потоке.

В частности, HCM 2000 [41] использует следующую формулу:

$$t_{оч} = t_1(PF) + t_2 + t_3, \quad (1.14)$$

где t_1 – стандартная задержка, предполагающая одинаково повторяющееся прибытие автомобилей к перекрестку, с/прив. ед.; PF – коэффициент прогрессии для стандартной задержки, учитывающий прогрессию регулирования; t_2 – дополнительная задержка, учитывающая случайность прибытия транспортных средств, при этом предполагается, что величина начальной очереди автомобилей равна нулю, с/прив. ед.; t_3 – начальная задержка, связанная с задержкой автомобилей, прибывших в течение анализируемого периода, образующаяся из-за очереди транспортных средств, имеющейся в начале данного периода, с/прив. ед.

Большое значение в расчете величины задержки транспорта имеют коэффициенты прогрессии. Величина прогрессии регулирования обозначает долю ав-

томобилей, прибывших к пересечению за время зеленого сигнала. При рассмотрении группы движения, коэффициент прогрессии используется для каждой координированной группы движения, в том случае, если отсутствует адаптивное регулирование. Т.к. коэффициент преимущественно оказывает влияние на величину стандартной задержки, то и используется он именно для вычисления стандартной задержки. Кроме того, коэффициент прогрессии используется для расчета длины очереди при данной задержке. Он определяется как [41]:

$$PF = \frac{(1-P)f_{PA}}{1 - \frac{g}{C}}, \quad (1.15)$$

где PF – коэффициент прогрессии для стандартной задержки, учитывающий прогрессию регулирования; P – доля транспортных средств, прибывших в течение зеленого сигнала; g/C – доля зеленого сигнала; f_{PA} – коэффициент, учитывающий тип прибытия транспортных средств к регулируемому пересечению.

Таким образом, в данной ситуации рассматривается несколько вариантов развития событий, в том числе и для ситуаций, когда загрузка движением больше единицы. Однако применимость данного метода для российских условий в настоящее время не определена.

Кроме того, существуют и экспериментальные методы оценки задержки транспорта на пересечении. Проводится подсчет числа стоящих автомобилей ($n_{ст}$) на входе перекрестка через равные, достаточно малые промежутки времени δ . Тогда средняя задержка автомобиля [36, 38, 72, 73, 114]:

$$t_w = \frac{\delta \sum_{i=1}^n n_{ст}}{n_{пр}}, \quad (1.16)$$

где n – число замеров; i – номер замера; $n_{пр}$ – число автомобилей, проехавших перекресток за тот же период, авт. (практическая пропускная способность).

Также возможен подсчет задержки транспортного средства путем наблюдения за отдельными автомобилями с момента их прибытия в очередь до момента выхода из очереди. При наличии большого количества измерений этот метод

более точен, т.к. не происходит двойного учета транспортных средств, но он достаточно трудоемок. Для точного определения задержки транспорта в очереди на пересечении целесообразно, на наш взгляд, построение имитационной модели, которая позволит получить все необходимые зависимости.

Выводы к главе 1

1. Для определения области исследования вариантов пересечений автомобильных дорог целесообразно ограничиться типовыми вариантами, соответствующими альбому типовых проектов и требованиям нормативной литературы. Такими пересечениями являются полностью канализированное пересечение и транспортная развязка «клеверный лист».

2. Основным критерием выбора типа пересечения автомобильных дорог в настоящее время является критерий минимума суммарных приведенных затрат, на величину которого в значительной степени влияет средняя задержка транспорта на пересечении.

3. Основную часть задержки транспорта на пересечении составляет время ожидания в очереди, для определения которого при загрузке движением близком или большем единицы в настоящее время нет достаточно точных теоретических методов, но предлагается ряд экспериментальных методов.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОБЩЕЙ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДЕРЖКИ НА ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ

2.1 Общие положения теории транспортных потоков

В зависимости от цели могут быть выделены две большие группы теорий транспортных потоков: стохастические (вероятностные) и динамические [31, 37, 47, 53–55, 91, 92] (рисунок 2.1).

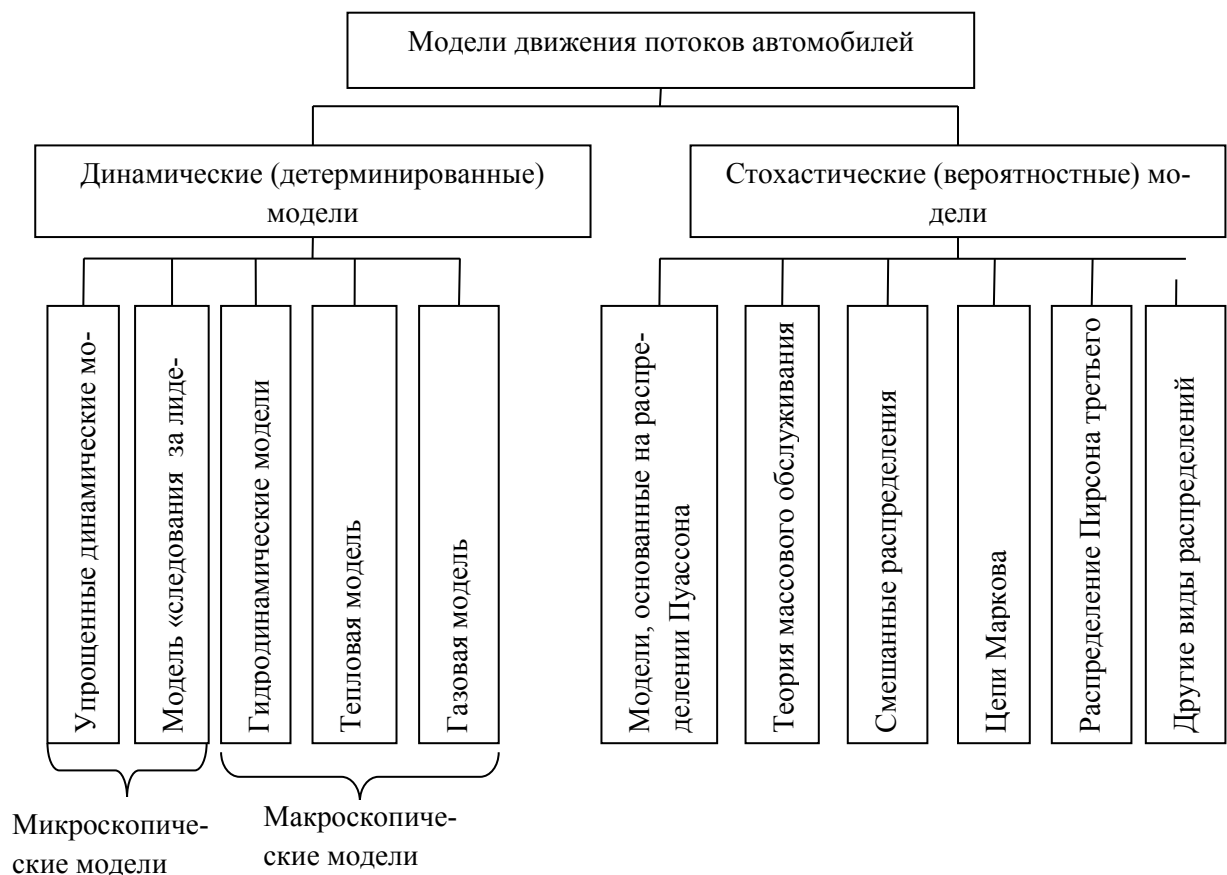


Рисунок 2.1 – Классификация моделей движения автомобилей

Динамические модели описывают как динамику взаимодействия между моделями, так и динамику движения всего потока в целом. При динамическом моделировании движения транспортного потока можно выделить два подхода: макроскопический и микроскопический. При этом моделируется динамика взаимодей-

ствия: между отдельными автомобилями (микроскопический подход) и динамика движения потока в целом (макроскопический подход).

Примером микроскопического подхода являются упрощенные динамические модели и теория «следование за лидером». На этих моделях изучают закономерности, существующие внутри потока между отдельными автомобилями, а полученные выводы распространяют на весь поток. Макроскопический подход использован в гидродинамических, газовой и других моделях. Динамические модели позволяют решать широкий класс задач, связанных с оценкой характера движения потока автомобилей, а также исследовать пропускную способность дорог.

Стохастические модели позволяют дать количественную оценку характера движения потоков, в которых еще возможна свобода маневрирования автомобилей.

Распределение применения моделей транспортных потоков представлено на рисунке 2.2 [97, 85, 86, 87].

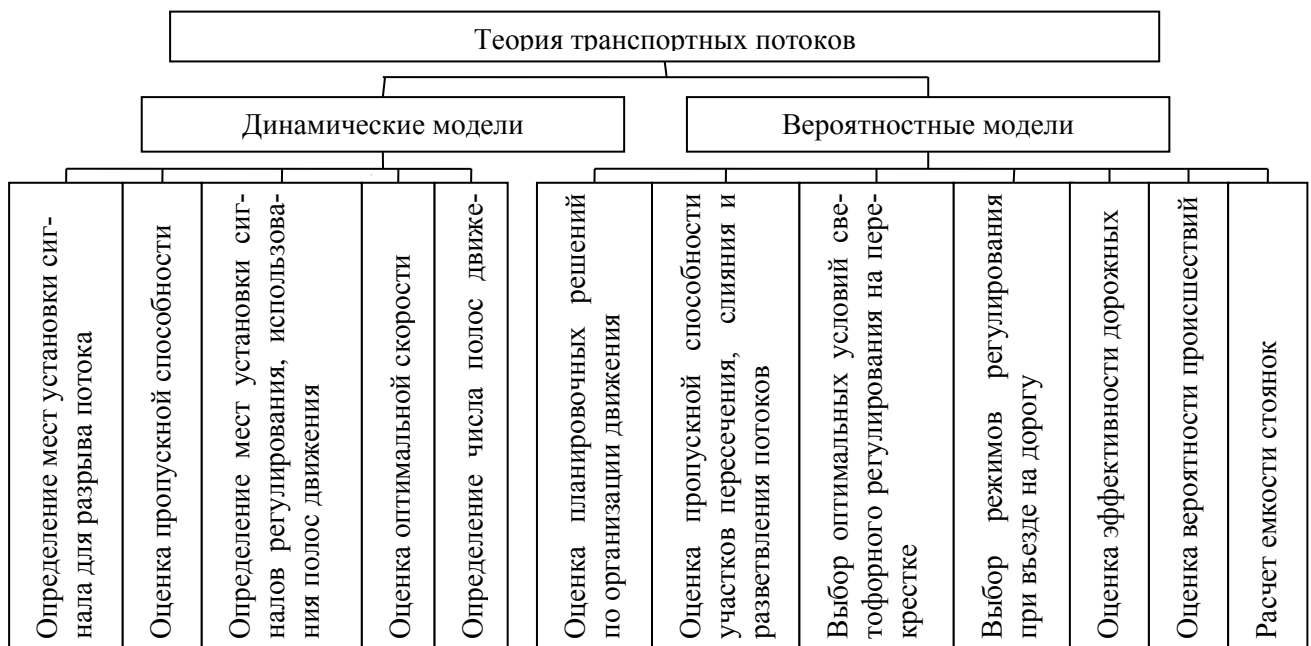


Рисунок 2.2 – Задачи, решаемые при помощи теорий транспортных потоков

Учитывая, что транспортная задержка и длина очереди являются функцией от пропускной способности транспортной артерии, для анализа данных показателей необходимо воспользоваться именно стохастическими теориями транспортных потоков.

Основываясь на работах Ф. Хейта [106], Д. Дрю [24], Х. Иносе, Т. Хамада [27], Е.М. Лобанова [43], В.В. Сильянова [91, 92] в качестве основной математической структуры для моделирования транспортной задержки следует принять систему массового обслуживания (СМО) [70, 35], схема которой представлена на рисунке 2.3.

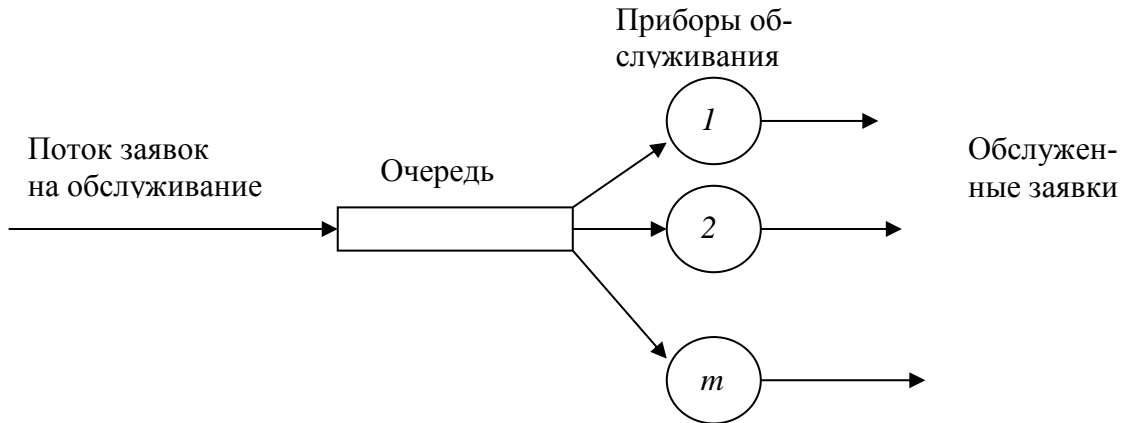


Рисунок 2.3 – Классическая схема системы массового обслуживания

Для моделирования транспортной задержки по данной схеме (рисунок 2.3) требуется определение таких параметров, как распределение входящего потока и распределение потока обслуженных заявок.

Для более точной привязки объектов СМО к реальной обстановке на пересечении и особенностям транспортного потока выделим несколько зон (рисунок 2.4).

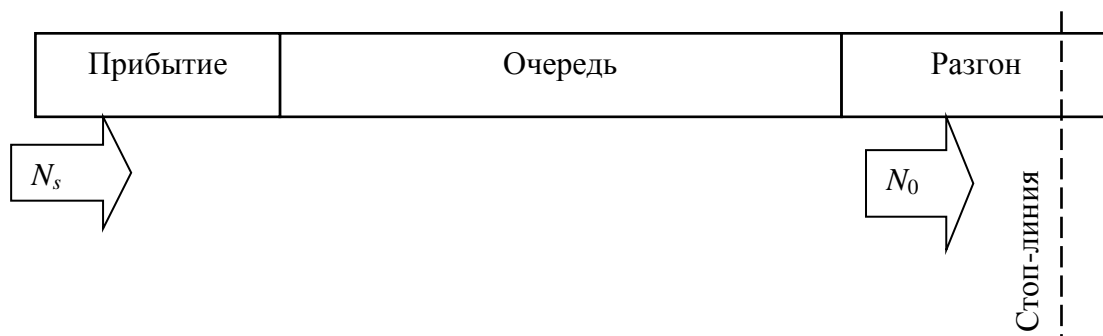


Рисунок 2.4 – Схема привязки объектов системы массового обслуживания к обстановке на пересечении и состоянию транспортного потока

зона «Прибытие» – здесь определяется распределение входящего потока; зона «Очередь» – это либо автомобили, ожидающие проезда, либо движущиеся автомобили, имеющие между собой тесную взаимосвязь; зона «Разгон» – начиная от стоп-линии и далее определяется распределение исходящего потока

Из рисунка 2.4 видно, что распределение входящего потока применительно к пересечению есть распределение прибытия транспортных средств к стоп-линии. Однако при экстремальных значениях коэффициента загрузки правильнее говорить о прибытии в очередь, т.к. в теоретической схеме заявки не имеют пространственных характеристик, а практические же исследования показывают взаимосвязь между расстоянием от ближайшего пересечения на распределение автомобилей в пачке. Во-вторых, различные авторы используют различные распределения, так Е.М. Лобанов [43] рекомендует трехкомпонентное экспоненциальное распределение:

$$P_{\lambda} = Ae^{-\beta_1\lambda} + Be^{-\beta_2\lambda} + Ce^{-\beta_3\lambda}. \quad (2.1)$$

Такое распределение позволяет выделить три составные части: свободную, частично связанную и связанную, где функция $Ae^{-\beta_1\lambda}$ описывает распределение интервалов в свободной части потока, а $Be^{-\beta_2\lambda}$ и $Ce^{-\beta_3\lambda}$ – описывает распределение интервалов в частично связанной и связанной части потока. Физический смысл коэффициента β – отклонение величины математического ожидания количества автомобилей, проходящих через створ наблюдения в единицу времени, от теоретического значения $m = \frac{N}{T}$.

Д.С. Мартяхин [48] указывает на применимость данного распределения для высокой интенсивности движения вплоть до 2200 авт./ч. Кроме того, указанное распределение рекомендовалось в нормативной литературе [80, 81], в частности «Руководством по оценке пропускной способности автомобильных дорог» [79].

Возможны использования и других распределений. Так, Р.В. Андронов [2] для городских условий предлагает использовать нормальное распределение, а А. С. Липницкий [42] рекомендует распределение Кована с параметром Таннера:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < t_m \\ \alpha\lambda e^{-\lambda(t-t_m)}, & \text{если } t \geq t_m \end{cases}, \quad (2.2)$$

где t_m – параметр смещения (величина минимального интервала в потоке), s ; α – доля свободной части транспортного потока, определяемая формулой Таннера:

$$\alpha = 1 - t_m q_p, \quad (2.3)$$

где q_p – интенсивность движения на главном направлении авт./с; λ – параметр распределения, определяемый по формуле:

$$\lambda = \frac{\alpha q_p}{1 - t_m q_p}. \quad (2.4)$$

Таким образом, существует множество различных распределений для описания интервалов в транспортном потоке, при этом все авторы единодушны в одном: распределение Пуассона имеет ограниченное применение при малых интенсивностях, что затрудняет поиск аналитического решения в задаче определения транспортной задержки.

Определение вида распределения исходящего потока несет в себе некоторые сложности. Любое транспортное средство, в отличие от абстрактной математической точки-заявки, имеет определенную длину, т.е. перемещение транспортного средства через стоп-линию происходит не мгновенно и накладывает ряд условий на определение момента окончания обслуживания. Наиболее полно эта особенность была проанализирована в [109], (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Способы фиксирования транспортного средства в исходящем потоке

| Метод | Фиксируемая часть автомобиля | Учитываемые автомобили |
|------------------------------------|------------------------------|--|
| Минимально установившийся интервал | Задний бампер | С момента установления минимального интервала движения |
| Метод В.Ф. Вебстера | Передний бампер | Без автомобилей первых и последних 6-ти секундах такта |
| Без первых трех автомобилей | Задняя ось | Начиная с четвертого автомобиля |
| Без первых четырех автомобилей | Передняя ось | Начиная с пятого автомобиля |
| Метод А.Г. Левашева | Задний бампер | Соответствующие интервалу насыщения |
| Канадский метод | Передний бампер | Все |

При высокой загрузке транспортные средства, пройдя стоп-линию, не всегда покидают пересечение. Следовательно, необходимо их фиксировать на всем протяжении зоны разгона.

Определение границы очереди имеет свои сложности. Когда очередь ожидает проезд через перекресток, граница видна достаточно четко, но в случае движущейся очереди наблюдателю самостоятельно приходится делать вывод о принадлежности того или иного автомобиля к очереди на основе собственного опыта.

Применение классической теории массового обслуживания и, следовательно, нахождение аналитического решения в поставленной задаче невозможны. В данном случае целесообразно выбрать метод имитационного моделирования для нахождения численного решения и оформления его в виде номограмм.

В качестве среды имитационного моделирования выбрана Anylogic, библиотека Enterprise Library, которая позволяет моделировать сети СМО любой сложности [34]. Для решения поставленной задачи выполнена привязка объектов к выделенным зонам на пересечении (рисунок 2.5).

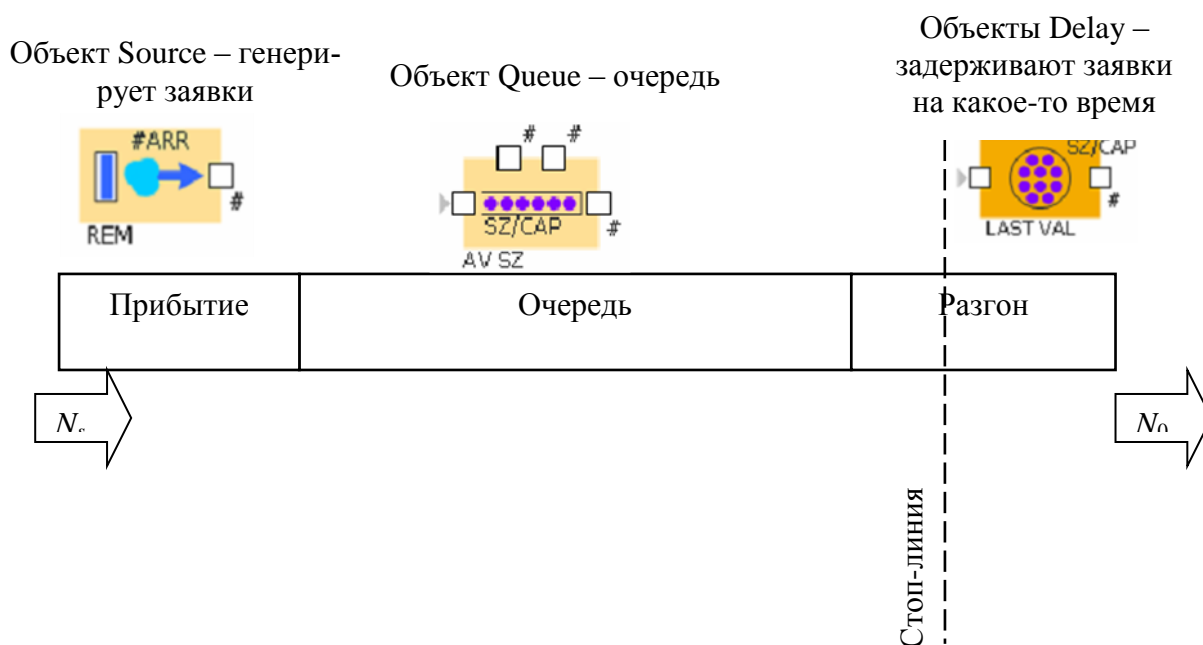


Рисунок 2.5 – Привязка объектов Anylogic к схеме движения на пересечении

Из рисунка 2.5 видно, что дискретно-событийный подход лишь фиксирует по событию отдельные моменты времени. Безусловно, основная часть транспорт-

ной задержки составляет именно ожидание очереди, но также необходимо учитывать снижение скорости на подходе к пересечению и потерю времени на разгон и торможение. Преимущества среды имитационного моделирования в том, что она позволяет учесть дополнительные потери времени путем использования существующих аналитических зависимостей.

2.2 Моделирование транспортной задержки на пересечении в одном уровне

Все пересечения в одном уровне можно разбить на две большие группы: простые пересечения, для которых существуют типовые проекты; нестандартные пересечения, для которых требуется индивидуальное проектирование. Наиболее массовыми являются пересечения, выполненные по типовым проектам, следовательно, в первую очередь необходимо разработать модели для них. В настоящее время все большее распространение получают кольцевые пересечения, области применения которых определены в [42, 111].

После привязки объектов Anylogic к типовому проекту пересечения с одной полосой движения получаем схему моделирования, представленную на рисунке 2.6.

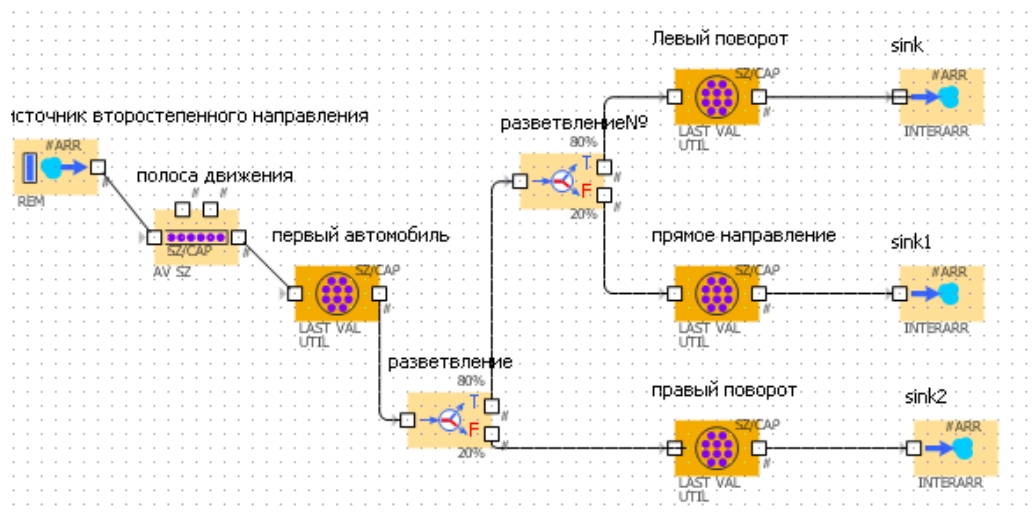


Рисунок 2.6 – Схема моделирования второстепенного потока на пересечении

Объекты Anylogic обладают возможностью выполнять заранее заданные алгоритмы на входе и на выходе. Здесь также можно устанавливать любые типы за-

явок и изменять значения вложенных в них констант. Все это позволяет вести учёт времени для каждой заявки и менять характеристики заявок (время обслуживания и стоимость задержки по установленным зависимостям).

За основу продвижения заявки принята модель, предлагаемая в [43, 45].

Входящий поток с распределением $P_\lambda = Ae^{-\beta_1\lambda} + Be^{-\beta_2\lambda} + Ce^{-\beta_3\lambda}$ прибывает со стороны второстепенной дороги к перекрестку, где в пачке транспортное средство ожидает безопасного интервала $\Delta t_{\text{гр}}$, который ещё называют граничным. При наличии такого интервала в основном потоке, т.е. при выполнении условия $\Delta t_{\text{гр}}^{(1)} = \Delta t_{\text{гр}}$, происходит маневр. Время обслуживания определяется для каждой пачки по отдельности и будет составлять для пропуска:

$$\text{одного автомобиля } \Delta t_{\text{гр}}^{(1)} = \Delta t_{\text{гр}}, \quad (2.5)$$

$$\text{двух автомобилей } \Delta t_{\text{гр}}^{(2)} = \Delta t_{\text{гр}} + \delta t_2, \quad (2.6)$$

$$\text{трех автомобилей } \Delta t_{\text{гр}}^{(3)} = \Delta t_{\text{гр}} + \delta t_2 + \delta t_3, \quad (2.7)$$

$$i \text{ автомобилей } \Delta t_{\text{гр}}^{(i)} = \Delta t_{\text{гр}} + \delta t_2 + \delta t_3 + \dots + \delta t_i, \quad (2.8)$$

где δt – интервалы между автомобилями, выходящими на пересечение с второстепенной дороги.

Первоначально определение граничного интервала было сформулировано Greenshields [119] и Raff [125], в результате исследования размеров интервалов, которые первый водитель в очереди выбирает для маневра. Статистическая обработка проводилась следующим образом: определялись интервалы, которые водители принимали для движения (+) и, которые водители отклоняли (-); устанавливалось распределение вероятностей как для отклоненных H^- , так и для принятых H^+ интервалов.

Greenshields определял, что интервал, который принимался половиной водителей, а второй половиной отклонялся, как граничный интервал t_g , который определяется по медиане следующего распределения:

$$h^+ = \frac{H^+}{H^+ + H^-}, \quad (2.9)$$

где H^+ – функция распределения принятых интервалов; H^- – функция распределения отклоненных интервалов; h^+ – функция распределения граничных интервалов.

Значению граничного интервала соответствует значение 0,5 распределения h^+ . Распределение показывает вероятность, с которой водителями может быть принят временной интервал меньше и равный соответствующему значению (рисунок 2.7). Также отметим, что отечественные исследователи [45] использовали именно такое определение граничного интервала.

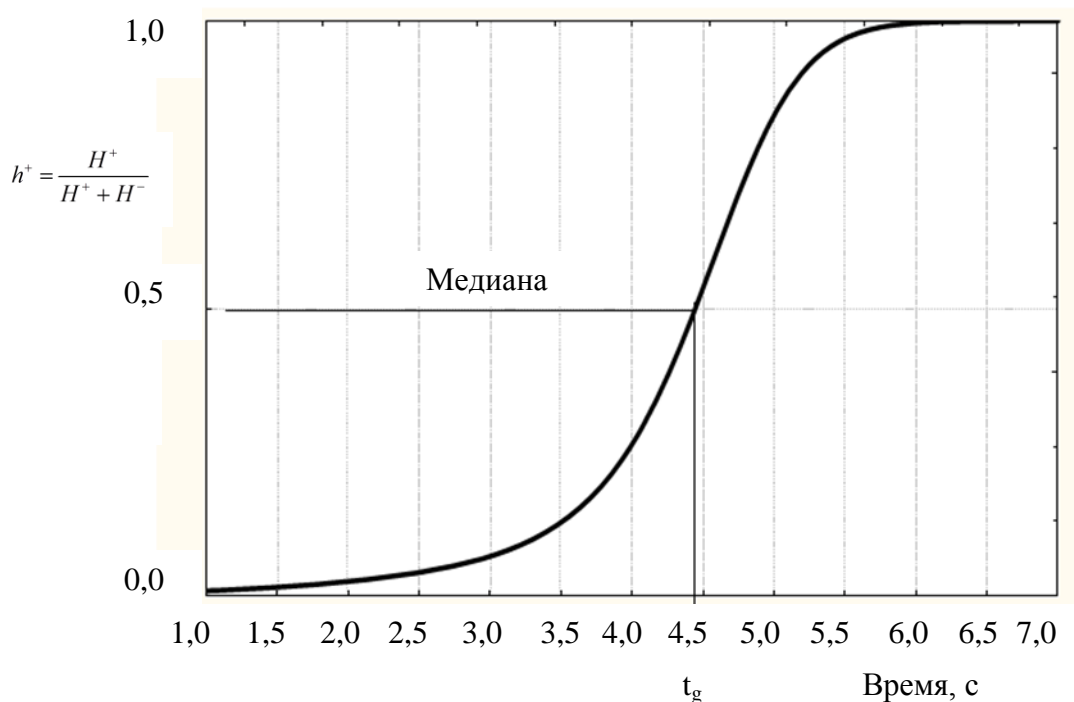


Рисунок 2.7 – Определение граничного интервала по Greenshields

Raff определил граничный интервал как интервал, для которого число временных интервалов меньше граничного интервала, которые были отклонены водителями, равно числу принятых интервалов, больших, чем граничный интервал. При этом граничный интервал определяется точкой пересечения прямой (для принятых интервалов) и обратной (для отклоненных интервалов) кумулятивных кривых (рисунок 2.8).

В случае, когда величина интервала между транспортными средствами в главном направлении значительно больше граничного интервала, после первого

транспортного средства во второстепенном направлении начинают движение и другие транспортные средства, с определенным временным интервалом, определенно меньшим, чем граничный интервал. Таким интервалом называется интервал следования, который главным образом зависит от наличия у водителей возможности свободно ориентироваться (видимость).

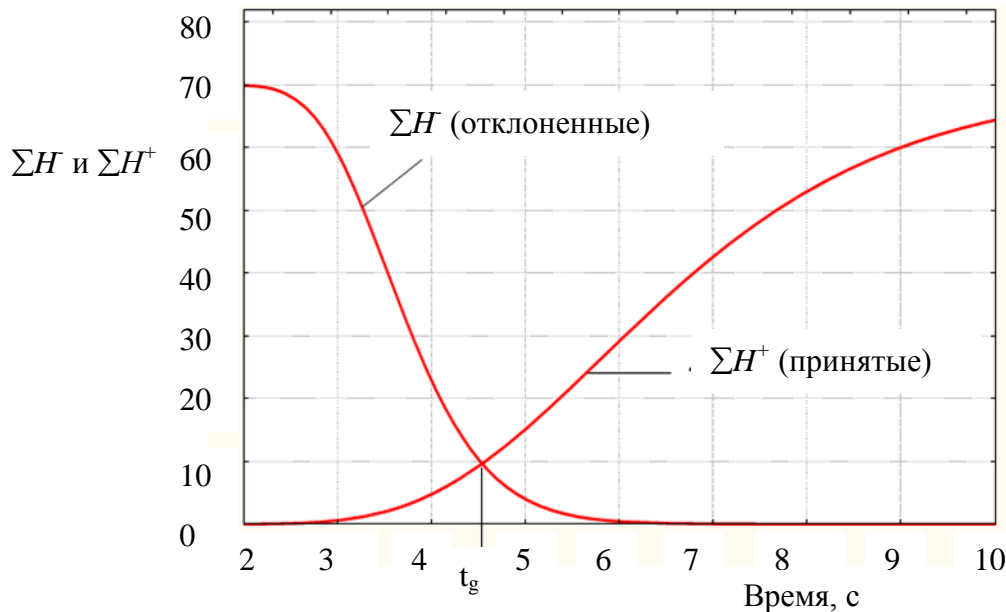


Рисунок 2.8 – Определение граничного интервала Raff

Практика показала, что величина интервала следования представляет собой приблизительно постоянную величину. В этом случае закон движения второстепенного потока на нерегулируемом пересечении можно описать как

$$n = \frac{t - t_g}{t_f} + 1, \quad (2.10)$$

где n – число транспортных средств, которые успевают проехать во второстепенном направлении при величине временного интервала между транспортными средствами в главном направлении равной t ; t_g – граничный интервал; t_f – интервал следования.

Выделение в модели первого автомобиля в очереди обусловлено тем, что именно он выбирает граничный интервал, остальные автомобили следуют за ним с несколько меньшим и более постоянным интервалом [32, 33, 46, 49, 50]. Учи-

тывая вышеизложенное, для моделирования используем алгоритм, представленный на рисунке 2.9.

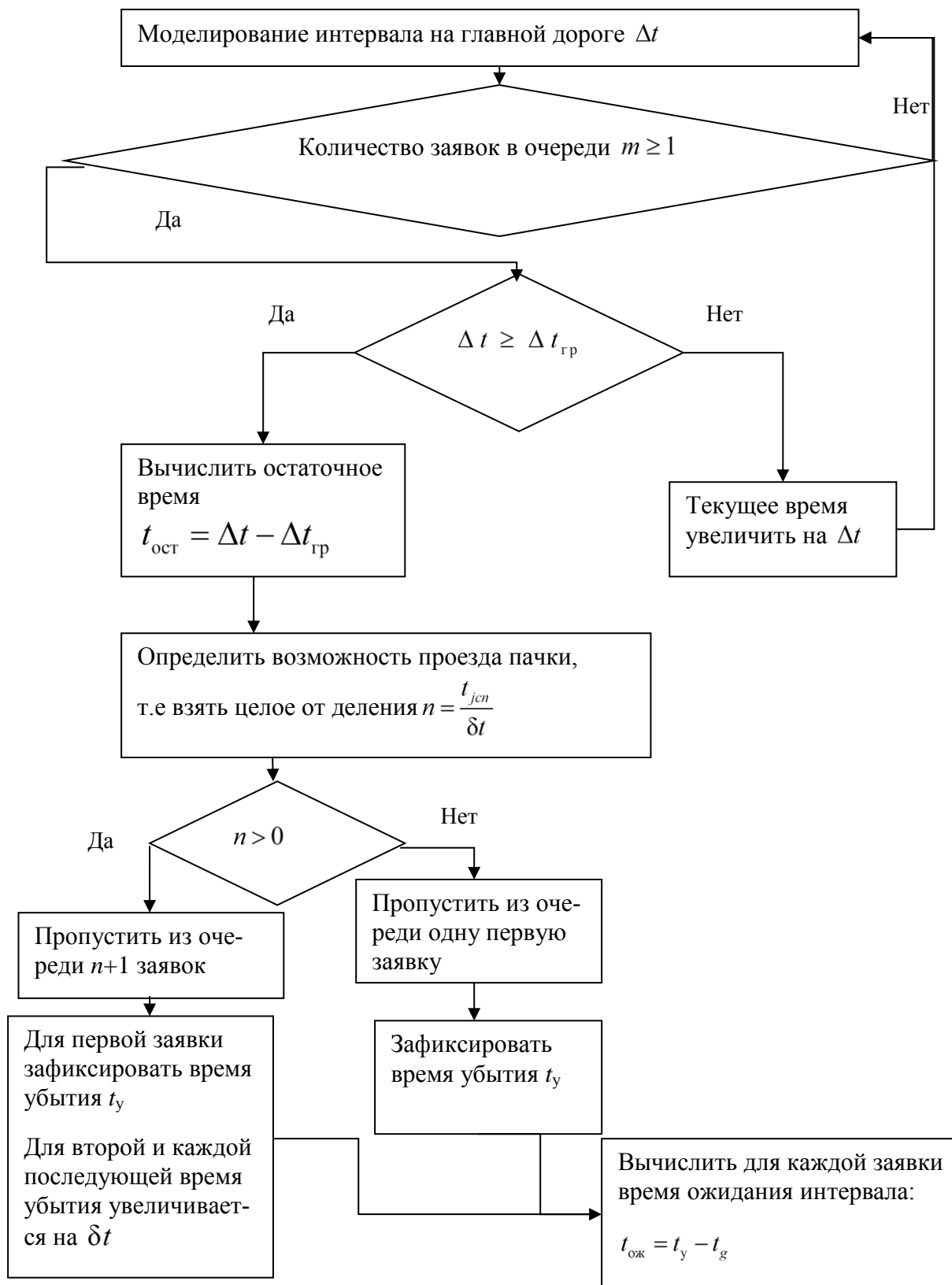


Рисунок 2.9 – Моделирование выбора безопасного интервала автомобилями из очереди

2.3 Моделирование транспортной задержки на пересечениях в разных уровнях

Модели для определения задержки на пересечениях в разных уровнях строятся по тому же принципу, что и в одном уровне, но имеют некоторые характерные отличия. Для пересечений в разных уровнях правильней говорить об эффективности применения различных типов съездов [57, 58, 60, 61]. Здесь есть другие подходы определения граничного промежутка времени. Так, В.В. Столяров [96] основываясь на теории риска и исходя из риска ДТП, допускаемого водителями, предлагает следующие зависимости для определения граничного интервала для транспортных развязок: математическое ожидание граничного интервала при интенсивности движения на полосе основной дороги N_1 и съезде N_2 устанавливается по зависимости:

$$S_{\text{гр}} = 500 \left(\frac{v_1 - v_2}{q_2 v_1} + \frac{2}{q_x} \right) + d_2, \quad (2.11)$$

где $S_{\text{гр}}$ – граничный интервал между автомобилями, м; v_1 – скорость движения автомобиля на полосе главной дороги, км/ч; v_2 – начальная скорость движения автомобиля, совершающего маневр пересечения главной дороги, км/ч; q_2 – плотность движения на съезде или переходной-скоростной полосе, авт./ч; q_x – допустимая мгновенная плотность движения между транзитными и вливающимися в поток автомобилями авт./ч; d_2 – длина автомобиля, пересекающего основную дорогу, м.

Выражение для определения $\sigma_{\text{ф}}$ – фактического отклонения интервала $S_{\text{гр}}$ при интенсивности движения N получены путем дифференцирования в частных производных формулы (2.12):

$$\sigma_{\text{ф}} = 500 \sqrt{\left(\frac{1}{v_2 q_2} + \frac{1}{v_1 q_x} \right)^2 \sigma_{v_1}^2 + \left(\frac{v_2 + v_1}{2 v_2^2 q_2} \right)^2 \sigma_{v_2}^2 + \left(\frac{\sigma_{N_1}}{N_1 q_x} \right)^2 + \left(\frac{v_1 - v_2}{2 N_2 v_2 q_2} \right)^2 \sigma_{N_2}^2}, \quad (2.12)$$

где σ_{v_1} и σ_{v_2} – средние квадратические отклонения скоростей движения транзитного и вливающегося автомобилей, км/ч; σ_{N_1} и σ_{N_2} – средние квадратические отклонения интенсивности движения на полосе основной дороги и съезде, устанавливаемые в процессе измерений.

В нашем случае значение σ_ϕ составит:

$$\sigma_\phi = 0,1S_{\text{гр}}. \quad (2.13)$$

В более общем случае, при пересечении главной дороги автомобилем второстепенного направления, используют ту же модель, но с учетом направления пересекающихся потоков:

$$S_{\text{гр}} = 1000 \left[\frac{v_1}{v_2 q_2} + \frac{1}{q_x} - \left(\frac{v_k - v_2}{2v_2 q_2} + \frac{1}{q_2} \right) \right] + d_2 + C, \quad (2.14)$$

v_k – скорость движения того же автомобиля в конфликтной точке, км/ч; C – приращение граничного интервала, определяемое в зависимости от угла α между векторами скоростей движения автомобилями основного и второстепенного направлений. Устанавливается в момент прохождения конфликтной точки.

При $\alpha = 0^\circ$ ч 90° :

$$C = 500 \frac{v_1 - v_k}{v_2 q_2} \cos(180 - \alpha) \sin \alpha. \quad (2.15)$$

При $\alpha = 90^\circ$ ч 180° :

$$C = 500 \frac{v_1 - v_k}{v_2 q_2} \cos(180 - \alpha), \quad (2.16)$$

где α – угол между векторами скорости движения, град.

Параметр q_x определяют как

$$q_x = \sqrt{\frac{N_1 q_1^{\text{зат}}}{v_1}}, \quad (2.17)$$

где N_1 – интенсивность движения по полосе главной дороги; $q_1^{\text{зат}}$ – плотность при заторе на полосе основной дороги:

$$q_2^{\text{зат}} = \frac{100q_0^{\text{зат}}}{\sum_i^n c_i E_i}, \quad (2.18)$$

где $q_0^{\text{зат}}$ – плотность при заторе легковых автомобилей:

$$q_0^{\text{зат}} = \frac{1000}{a+d}, \quad (2.19)$$

$$\bar{a} = \frac{S}{\frac{6}{u\sqrt{2}} - 1}, \quad (2.20)$$

где S – среднее фактическое значение интервала и области допускаемого водителями риска, м; устанавливается по таблице 2.2;

Таблица 2.2 – Среднее фактическое значение интервала

| Транспортные средства | | | Величина интервала, м, в зависимости от % обеспеченности | | | Среднее квадратическое отклонение |
|-----------------------|---------------------|------------------|--|------|------|-----------------------------------|
| классификация | грузоподъемность, т | средняя длина, м | 15 % | 60 % | 85 % | |
| Легковые | – | 4,122 | 0,82 | 1,30 | 1,66 | 0,33 |
| Грузовые: | | | | | | |
| легкие | До 2т | 5,13 | 1,05 | 1,62 | 2,2 | 0,46 |
| средние | 5 т | 6,40 | 1,33 | 2,05 | 2,78 | 0,58 |
| тяжёлые | 8 | 7,61 | 1,64 | 2,4 | 3,18 | 0,65 |
| Автобусы: | | | | | | |
| типа ПАЗ | – | 7,15 | 1,7 | 2,3 | 2,8 | 0,6 |
| типа ЛАЗ | – | 9,19 | 2,20 | 2,92 | 3,45 | 0,73 |

u – подынтегральная функция, которая зависит от величины допускаемого риска, представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения подынтегральной функции для заданного уровня риска

| | | | | |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| r | $1 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-5}$ |
| U | 2,328 | 3,095 | 3,720 | 4,174 |

c_i – количества автомобилей i -го типа в составе транспортного потока, %; n – число типов автомобилей; E_i – коэффициент приведения; определяется по таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Коэффициенты приведения

| Транспортные средства | | | Величина интервала, м, в зависимости от % обеспеченности | | |
|-----------------------|---------------------|------------------|--|------|------|
| классификация | грузоподъемность, т | средняя длина, м | 15 % | 60 % | 85 % |
| Легковые | – | 4,122 | 0,82 | 1,30 | 1,66 |
| Грузовые: легкие | До 2т | 5,13 | 1,05 | 1,62 | 2,2 |
| средние | 5 т | 6,40 | 1,33 | 2,05 | 2,78 |
| тяжёлые | 8 | 7,61 | 1,64 | 2,4 | 3,18 |
| Автобусы: типа ПАЗ | – | 7,15 | 1,7 | 2,3 | 2,8 |
| типа ЛАЗ | – | 9,19 | 2,20 | 2,92 | 3,45 |

q_2 – плотность движения на полосе второстепенной дороги перед пересечением:

$$q_2 = \sqrt{\frac{N_2 q_2^{\text{зат}}}{v_2}}, \quad (2.21)$$

где N_2 – интенсивность движения по полосе второстепенной дороги, авт./ч; $q_2^{\text{зат}}$ – плотность при заторе на полосе второстепенной дороги.

При пересечении главной дороги последовательно возникают опасные ситуации на обеих полосах главного направления. По этому, в данной ситуации формулой пользуются дважды, а затем суммируют значения риска:

$$r_{12} = r_1 + r_2 - r_1 r_2, \quad (2.22)$$

где r_{12} – риск ДТП при пересечении главной дороги; r_1 – риск ДТП при пересечении первой полосы главной дороги; r_2 – риск ДТП при пересечении второй полосы главной дороги.

Следует учесть, что показатели, представленные в таблице 2.2, были установлены в 1980-х гг., следовательно, нуждаются в уточнении. В остальном алгоритм моделирования полностью аналогичен предыдущему.

2.4 Моделирование транспортной задержки на регулируемом пересечении

Для регулируемых пересечений распределение времени обслуживания определяет цикл работы светофора, но при этом важно учитывать, что непосредственно разъезд транспортных средств осуществляется не в соответствии с циклом, хотя и в зависимости от него. Возможны различные отклонения, вызванные неоднородной реакцией водителя, культурой вождения и т.д. [62, 63, 64, 66]. Исследования показывают, что разъезд начинается с запаздыванием после начала зеленого сигнала светофора и заканчивается позднее окончания желтого. Таким образом, для моделирования распределения обслуживания правильнее использовать время «эффективного цикла» (рисунок 2.10). На практике встречаются ситуации, когда движение транспортных средств начинается несколько раньше зеленой фазы и заканчивается несколько позже [7, 8, 11, 13, 18, 19].

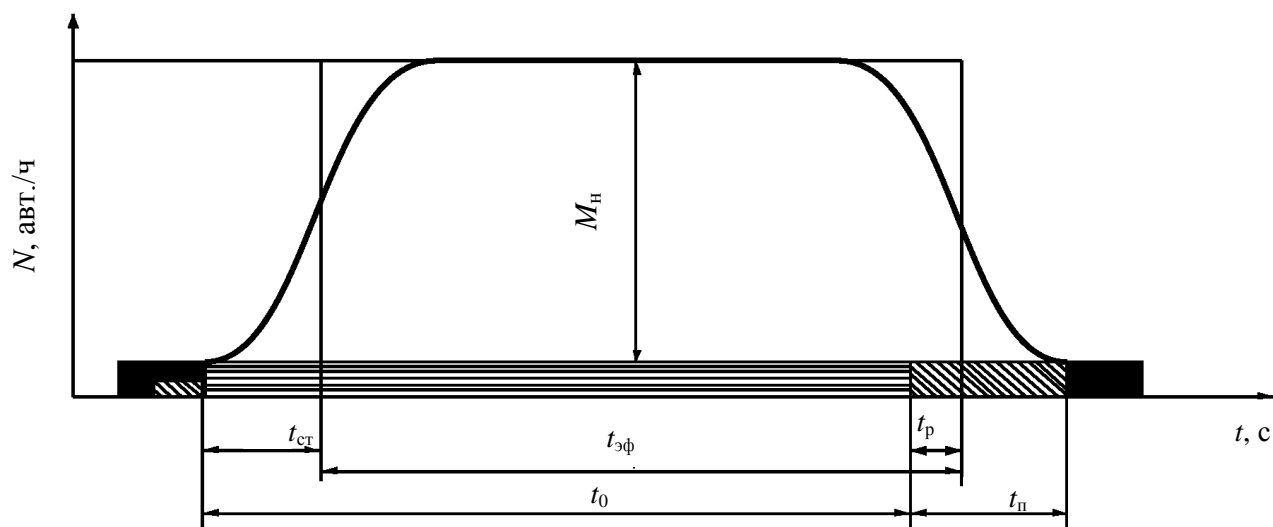


Рисунок 2.10 – Эффективная длительность фазы регулирования

$t_{ст}$ – стартовая задержка; $t_о$ – время основного такта; $t_п$ – время промежуточного такта; $t_р$ – время «прорыва» транспортных средств на второй желтый сигнал, которые не смогли своевременно остановиться у стоп-линии; N – интенсивность движения; $M_н$ – поток насыщения

Для описания транспортной задержки на регулируемом перекрестке существует несколько различных подходов (Вебстер, Миллер, Пир, Поляков и др.) [17, 30, 39, 40, 56, 68]; все они основаны на каких либо допущениях.

Наиболее точным и потому общепринятым подходом является формула Вебстера, которая адекватно работает при коэффициенте загрузки от 0,4 до 0,8. Это объясняется в первую очередь тем, что при выводе формулы была использована теория массового обслуживания (ТМО) с равномерно распределённым входящим потоком. Известно, что аналитическое решение уравнений ТМО возможно получить при равномерном, пуассоновском и вейбуловском входящих потоках, в остальных случаях поиск аналитического решения затруднителен. Кроме того, формула Вебстера получена в те годы, когда уровень автомобилизации еще не позволял формировать транспортный поток с загрузкой более 0,8.

Авторы исходили из того, что все накопленные за время запрещающего сигнала светофора автомобили разъедутся за зелёный сигнал, т.е. длительность транспортной задержки редко превышает размер цикла регулирования. В современных же условиях коэффициент загрузки, превышающий 0,8, и накопленная очередь являются нормой, что требует значительной корректировки существующих зависимостей.

Для этого более подробно рассмотрим процесс формирования транспортной задержки и выделим ключевые моменты (рисунок 2.11).

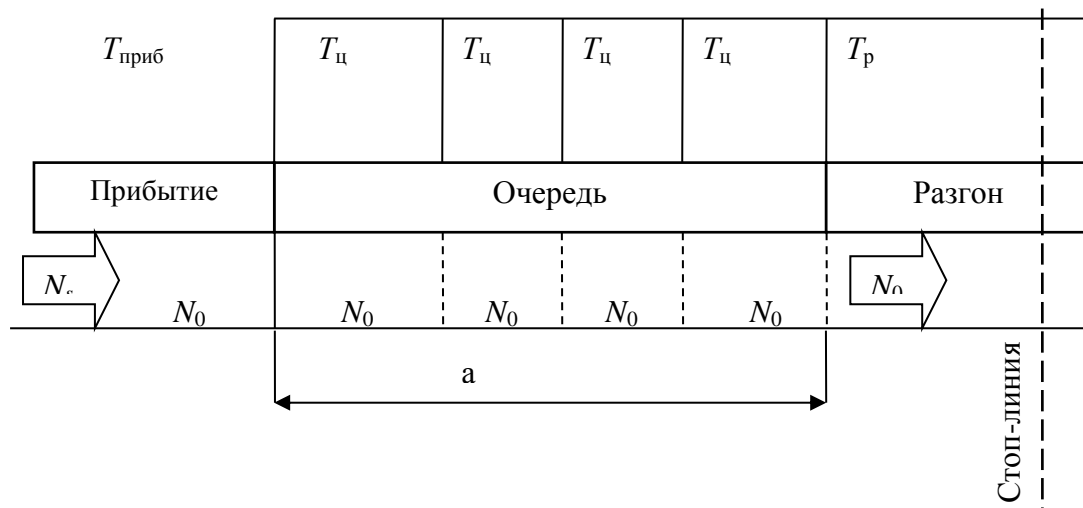


Рисунок 2.11 – Схема формирования транспортной задержки

Отсчет времени задержки транспортного средства (ТС) начинается с момента прибытия в створ дороги, где проводится наблюдение. Независимо от того, движется ли очередь на разрешающем сигнале светофора или стоит на запреща-

ющем, можно утверждать, что ТС для постановки в очередь будет снижать скорость. Внутри самой очереди происходит его перемещение в течение цикла с какой-то средней скоростью. В итоге, ТС покинет очередь на разгоне при разрешающем сигнале светофора. Таким образом, выделяются три основные зоны с разными условиями движения:

зона прибытия ТС – задержка выражается в снижении скорости на торможение;

зона очереди – задержка определяется скоростью перемещения очереди;

зона разгона – задержка определяется ускорением разгона и порядковым номером ТС в очереди.

Модель может быть построена из следующих общих допущений:

отсчёт времени начинается с началом разрешающей фазы и кратен времени цикла, следовательно, все остальные величины также будем рассчитывать исходя из времени цикла;

ТС прибывают к перекрестку с интенсивностью спроса N_s , авт./цикл;

за время разрешающего сигнала светофора очередь будет разгружена на величину потока насыщения N_0 , авт./цикл;

очередь разбивается по количеству ТС, равных N_0 .

Таким образом, в каждой последующей от стоп-линии пачке время задержки будет больше на величину $T_{ц}$ – время цикла, с.

В общем случае транспортная задержка сложится из следующих слагаемых:

$$T = T_{\text{приб}} + T_{\text{ож}} + T_{\text{р}}, \quad (2.23)$$

где $T_{\text{приб}}$ – транспортная задержка в зоне прибытия; $T_{\text{ож}}$ – транспортная задержка в зоне ожидания; $T_{\text{р}}$ – транспортная задержка в зоне разгона.

Рассмотрим более детально формирование каждого показателя.

$T_{\text{приб}}$ для одного ТС в течение цикла формируется после его прибытия в очередь:

$$T_{\text{приб}} = T_{\text{ц}} - t_{\text{приб}}, \quad (2.24)$$

$T_{\text{ож}}$ зависит от количества пачек, кратных потоку насыщения в зоне ожидания, на каждую a -пачку приходится задержка, равная времени цикла:

$$T_{\text{ож}} = aT_{\text{ц}}, \quad (2.25)$$

$T_{\text{р}}$ для данного ТС определится из времени реакции водителя на загоревшийся зелёный сигнал светофора и количеством ТС, покинувшим очередь:

$$T_{\text{р}} = t_{\text{р}} + \sum_{i=1}^n \delta_n, \quad (2.26)$$

где $t_{\text{р}}$ – время реакции водителя на загорание зелёного сигнала светофора, с; δ – интервал между ТС в створе стоп-линии, с; n – количество предшествующих ТС.

Также необходимо учитывать ряд характерных для экстремальных режимов загрузки показателей, например, возможность при достаточной ширине проезжей части появления дополнительных очередей и эффективного цикла, который лишь частично совпадает с циклом светофора. Для этого необходимо определить зависимости от коэффициента загрузки таких показателей как использование желтого сигнала и наличие ожидающих ТС перед стоп-линией.

Таким образом, для описания регулируемого пересечения используем следующую модель (рисунок 2.12).

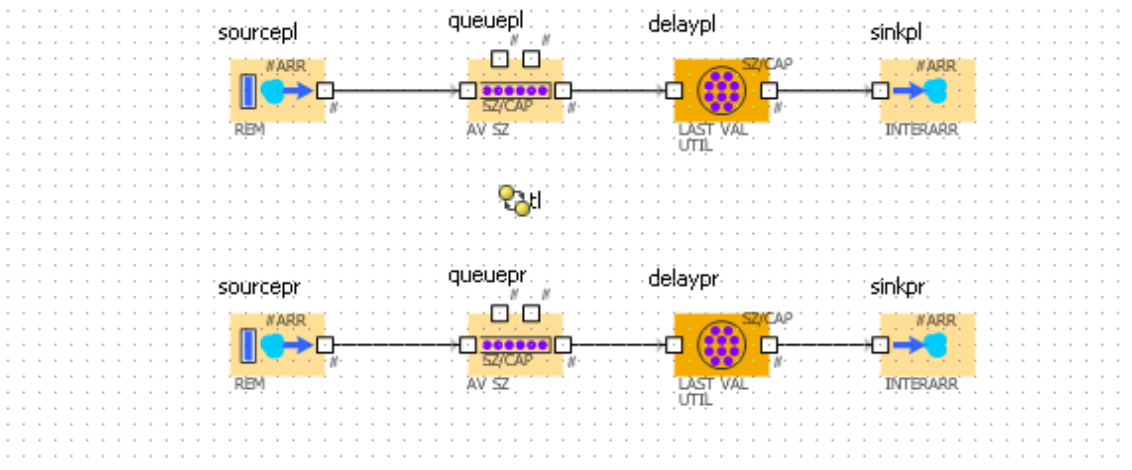


Рисунок 2.12 – Модель регулируемого пересечения с двумя полосами

В объектах source осуществляется генерация заявок ТС по выбранному распределению, в т.ч. возможно использование эмпирического распределения. Объект queue накапливает заявки перед пересечением. Объект delay моделирует

задержку транспортного средства на стоп-линии или в створе наблюдения. Объект tl – стэйтчарт, которым задается цикл регулирования (рисунок 2.13).

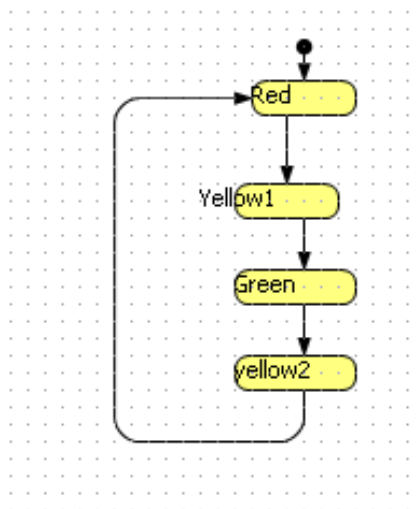


Рисунок 2.13 – Стейтчарт цикла регулирования

При красном сигнале светофора происходит блокирование объекта delay. При первом желтом осуществляется его разблокировка, и заявки из очереди могут обрабатываться.

Таким образом, при наличии значений параметров модели, полученных как путем экспериментального наблюдения, так и уточненных по нормативным документам, появляется возможность наблюдать и исследовать задержку транспорта в очереди с высокой точностью.

Выводы к главе 2

1. Основную часть транспортной задержки формирует ожидание в очереди, следовательно, для ее моделирования оптимально подходят стохастические теории транспортных потоков. Однако для определения других составляющих в определенных случаях целесообразно использование и детерминированных теорий.

2. Невозможно найти аналитическое решение поставленной задачи, т.к. входящий поток отличен от пуассоновского, вейбуловского и экспоненциального. Это обуславливает целесообразность применения метода имитационного моделирования.

3. Ключевым понятием для моделирования транспортной задержки на нерегулируемых пересечениях является граничный интервал, который с учетом риска ДТП, допускаемого водителями, определяется максимально точно.

4. Основой моделирования транспортной задержки на регулируемых пересечениях является длительность эффективной фазы. Имитационное моделирование позволяет учесть ряд дополнительных явлений самоорганизации транспортной системы на пересечениях автомобильных дорог.

3 ОБСЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1 Методика и проведение обследования регулируемых пересечений

Для наполнения общей имитационной модели необходимо определить ряд параметров и, в частности определить:

уровень допускаемого водителями риска, характерного для Свердловской области;

вероятностное распределение временных интервалов между автомобилями, прибывающими в очередь на пересечении;

вероятностное распределение временного интервала между разрешающим сигналом светофора и выходом первого автомобиля из очереди;

вероятностное распределение временного интервала между последующими автомобилями в очереди;

вероятностное распределение временного интервала между автомобилями в устоявшейся очереди;

однородность транспортного потока для выбранного типового направления при разных характеристиках движения.

Все показатели снимались при загрузке движением, превышающей 0,8.

Обследование проводилось на пересечениях пригорода Екатеринбурга, движение транспортных средств на пересечении снималось на видеокамеру с последующей обработкой на компьютере.

Количество необходимых замеров определялось по формуле (3.1) [3, 9, 14, 15]:

$$n = \frac{t^2 \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (3.1)$$

где t – коэффициент значимости, при доверительной вероятности 95 % $t = 1,96$, принято $t = 2$; σ – среднее квадратическое отклонение параметра, определяемое по разбросу между максимальным (C_{\max}) и минимальным (C_{\min}) параметрами:

$$\sigma = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6}, \quad (3.2)$$

где Δ – ожидаемая точность результатов измерения.

При проведении исследований выявлено $C_{\max} = 4,5$ м, $C_{\min} = 1,1$ м, следовательно:

$$\sigma = \frac{4,5 - 1,1}{6} = 0,567, \quad (3.3)$$

$$n = \frac{2^2 \cdot 0,567^2}{0,1^2} = 128,6, \text{ принимаем } 129.$$

Для определения уровня допустимого водителями риска замерялось расстояние между бамперами следующих друг за другом автомобилей в пробке. Предполагая, что интервалы между автомобилями имеют нормальное распределение, В.В. Столяров [96, 97] предлагает определять уровень допустимого водителями риска по формуле:

$$r = 0,5 - \Phi\left(\frac{C_i}{\sigma_c \sqrt{2}}\right), \quad (3.4)$$

где r – уровень допустимого водителями риска; $\Phi(u)$ – интеграл вероятности, определяемый по значению подынтегральной функции u ; C_i – фактические интервалы при заторе между однотипными автомобилями, м; σ_c – среднее квадратическое отклонение этих интервалов, м.

В итоге получены следующие значения для риска, допустимого водителями. Для расчетов рекомендуется выбирать 85%-ный уровень обеспеченности; таким образом, для условий Свердловской области риск, допустимый водителями, $r = 0,001183$, средняя величина интервала между автомобилями в заторе составляет 2,9 м (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Уровень риска, допускаемый водителями в Свердловской области

| Обеспеченность | 15 % | 50 % | 85 % |
|---|----------|----------|----------|
| Величина интервала между автомобилями в заторе в зависимости от обеспеченности, м | 1,63 | 2,3506 | 2,9 |
| Значение подынтегральной функции U | 1,713895 | 2,471584 | 3,049261 |
| Значение интегральной функции Ф | 0,456367 | 0,493244 | 0,498817 |
| Значение риска допускаемого водителями, г | 0,043633 | 0,006756 | 0,001183 |

Анализ нормативной литературы [51, 52] и используемых средств организации движения на регулируемых пересечениях позволил выделить типовые направления движения и параметры пересечения для дальнейшего рассмотрения (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Типовые направления и параметры на регулируемых пересечениях

| Направление | Только вправо | Только влево | Только прямо | Прямо и направо | Прямо и налево |
|-----------------------------|---|---|---|---|---|
| Рисунок |  |  |  |  |  |
| Значение типовых параметров | Наименьший радиус при сопряжении дорог в местах пересечений или примыканий в одном уровне принимается по категории главной дороги независимо от угла пересечения или примыкания для дорог 1, 2 категории – 25 м, дорог 3 категории – 20 м | | | | |

Обследование проводилось по следующей методике.

Для определения вероятностного распределения временного интервала между автомобилями, прибывающими в очередь, фиксировался момент полной остановки прибывшего автомобиля при неподвижной очереди либо момент установления тесной взаимосвязи между прибывшим автомобилем и предыдущим в очереди (при движущейся очереди). Из рассмотрения удалялись интервалы между грузовыми автомобилями; полученные результаты являются приведенными к потоку легковых автомобилей. Всего было проведено девять серий замеров на различных пересечениях.

При подборе случайных распределений временных интервалов прибывающих в очередь транспортных средств использовались критерии Пирсона и Романовского [22, 23, 28, 29]. Критерий Пирсона:

$$\chi^2 = \frac{(x - \hat{x})^2}{\hat{x}}, \quad (3.5)$$

где x – значение эмпирической функции распределения; \hat{x} – значение теоретической функции распределения.

Для критерия Пирсона принято считать совпадения теоретического и эмпирического распределения: отличным при $p > 0,5$; хорошим при $p = 0,3-0,5$; удовлетворительным при $p = 0,1-0,3$; неудовлетворительным при $p < 0,1(0,05)$.

Критерий Романовского позволяет уточнить в ряде случаев полученный результат по формуле:

$$R = \frac{\hat{\chi}^2 - 2}{\sqrt{2\nu}}, \quad (3.6)$$

где $\hat{\chi}^2$ – вычисленное значение χ^2 ; ν – количество степеней свободы.

Если критерий Романовского меньше трех, то гипотеза о соответствии фактической кривой распределения теоретическому закону распределения принимается. В противном случае делается вывод, что теоретический закон распределения не соответствует натурным данным.

Общепринято, что основными вероятностными распределениями для сравнения и выбора наилучшего являются экспоненциальное и логнормальное. Результаты сравнения сведены в таблицу 3.3. В серии из девяти экспериментов исследовались распределения интервалов входящего потока, т.е. интервалы времени до прибытия в очередь очередного автомобиля. Так как отечественные и зарубежные исследователи используют различные типы распределений, а в качестве базовой модели выбрана СМО, то необходимо установить применимость экспоненциального распределения и сравнить его применимость с другими. В результате анализа в программе Statistica полученных в ходе наблюдений данных установлено, что в большем количестве случаев удовлетворительный результат дает лог-

нормальное распределение. Результаты проверки типа распределения с помощью критерия Пирсона показаны в таблице 3.3.

Жирным шрифтом выделены случаи неудовлетворительной сходимости, а курсивом – условно удовлетворительной, т.е. при снижении уровня значимости. В случае если оба распределения подходят, выбиралось то, у которого p -значение выше.

Таблица 3.3 – Сравнение применимости экспоненциального и логнормального случайного распределения для описания входящего потока

| № серии | Экспоненциальное; полученные значения p для критерия Пирсона | Логнормальное; полученные значения p для критерия Пирсона | Распределение |
|---------|--|---|---------------|
| 1 | 0,00012 | 0,1168 | Логнормальное |
| 2 | 0,02057 | 0,31162 | Логнормальное |
| 3 | 0,00945 | 0,00281 | Не определено |
| 4 | <i>0,05592</i> | 0,21177 | Логнормальное |
| 5 | 0,000000 | 0,00095 | Не определено |
| 6 | 0,12281 | 0,22110 | Логнормальное |
| 7 | 0,42127 | 0,46688 | Логнормальное |
| 8 | 0,03527 | 0,14186 | Логнормальное |
| 9 | <i>0,08281</i> | 0,26418 | Логнормальное |

Таким образом, для дальнейшего наполнения модели рекомендуется логнормальное распределение, что исключает возможность аналитического решения, и подтверждает правильность использования системы имитационного моделирования.

При исследовании интервалов выходящего потока выявлено, что размер среднего интервала последовательно уменьшается в зависимости от номера по порядку транспортного средства, покинувшего очередь, и после пятого транспортного средства колеблется несущественно (рисунок 3.1), что видно по подобранной полиномиальной функции, коэффициент детерминации которой равен 0,8, т.е. зависимость значима.

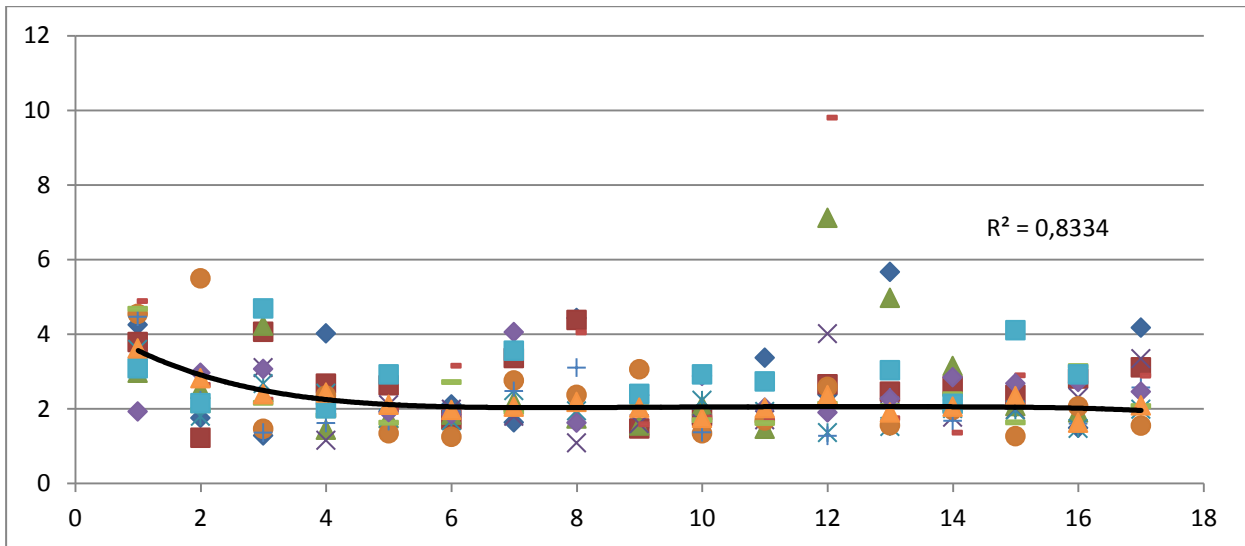


Рисунок 3.1 – Средний интервал между транспортными средствами
 — полиномиальная (средний интервал между транспортными средствами)

Таким образом, уместно подобрать функцию распределения для интервалов с первого по пятый в отдельности, а остальные объединить в колонное движение.

Для определения вероятностного распределения между автомобилями, убывающими из очереди, фиксировалось время разрешающего сигнала светофора (желтый, зеленый) и моменты прохождения заднего бампера автомобиля условного створа, который располагался на стоп-линии, а в случае отсутствия автомобилей – за стоп-линией либо на переднем бампере первого автомобиля. Использование в качестве разрешающего желтого сигнала позволило установить начало эффективной фазы регулирования; также получены результаты по использованию второго желтого сигнала и количества движений на красный свет, характерных для высокой загрузки. Вероятностные функции распределения использования второго желтого и красного сигналов автомобилями для различных направлений представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Использование второго желтого и красного сигналов

| Количество автомобилей, покинувших очередь после зеленого сигнала | Интегральная функция распределения для количества автомобилей, использовавших второй желтый и красный сигналы по направлениям | | | | | |
|---|---|---------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| | прямо и лево от желтого, % | прямо право от желтого, % | прямое от желтого, % | левое от красного, % | левое от желтого, % | правое от красного, % |
| 0 | 54 | 65 | 50 | 84 | 81 | 45 |
| 1 | 82 | 94 | 86 | 89 | 96 | 75 |
| 2 | 96 | 100 | 95 | 95 | 100 | 79 |
| 3 | 100 | – | 98 | 100 | – | 83 |
| 4 | – | – | 98 | – | – | 91 |
| 5 | – | – | 100 | – | – | 92 |
| 6 | – | – | – | – | – | 96 |
| 7 | – | – | – | – | – | 96 |
| 8 | – | – | – | – | – | 98 |
| 9 | – | – | – | – | – | 100 |

Для определения однородности выбранного типового направления замеры проводились при соблюдении следующих ограничений: пересечение отвечает условиям типового пересечения, но значения интенсивности движения и состав транспортного потока различны. После этого проведенный дисперсионный анализ позволил определить, существенны или нет различия во временных интервалах между автомобилями, покидающими очередь.

Результат дисперсионного анализа определялся показателем p -значением. Если его значение меньше требуемого уровня значимости (0,05), то гипотеза о равенстве дисперсий выборок при разных значениях влияющего фактора отвергается, что означает наличие существенных различий между параметрами транспортного потока на различных пересечениях. Итоги обследования сведены в таблицу 3.5. Результаты обследования необходимы для заполнения имитационной модели; для этой цели в таблице 3.5 приведены такие значения, как средний размер интервала, минимальный и максимальный размеры, дисперсия и среднее квадратическое отклонение.

В таблице 3.5 указано, от какого сигнала светофора измерялся первый временной интервал. Также указано рекомендуемое распределение – такое распределение, для которого было получено максимальное значение p .

Для случаев, когда ни одно из основных вероятностных распределений не удовлетворяет условиям подбора (результаты выделены жирным шрифтом), рекомендуется использование эмпирического распределения.

Из таблицы 3.5 видно, что в большинстве случаев выбранные распределения подходят по критерию Пирсона. Некоторые позиции, не подходящие по критерию Пирсона, подходят по критерию Романовского – они отмечены курсивом. Для значений, не подходящих ни по критерию Пирсона, ни по критерию Романовского, рекомендуется подбирать эмпирическую функцию распределения.

P -значение дисперсионного анализа показывает, что по всем, за исключением одного, выбранным направлениям различия от влияния всевозможных факторов на параметры транспортного потока незначительны, следовательно, данные параметры применимы для описания движения транспортного потока на всех типовых пересечениях. Для случаев, когда дисперсионный анализ показывает разницу в конфигурации транспортного потока на различных пересечениях, рекомендуется дополнительное обследование с целью установить причины несоответствия. В нашем случае – существенная разница в радиусах поворота. Наилучшие результаты, соответствующие нормативным значениям и отвечающие требованиям типовых пересечений, представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты обследования и анализа транспортных потоков на регулируемых пересечениях автомобильных дорог Свердловской области

| Направление | Номер интервала | Математическое ожидание длины интервала, с | Дисперсия | Среднеквадратическое отклонение | Минимальное значение, с | Максимальное значение, с | Рекомендуемое распределение | <i>p</i> -значение критерия Пирсона | Значение критерия Романовского (<i>R</i>) | <i>P</i> -значение дисперсионного анализа |
|---------------------------|-------------------|--|-----------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|---|
| Только левое от желтого | 1 | 3,70 | 3,69 | 1,92 | 0,002 | 8,35 | Эмпирическое | 0,0122 | 3,733 | 0,279 |
| | 2 | 3,09 | 0,97 | 0,98 | 1,22 | 5,74 | Логнормальное | 0,84 | - 0,678 | 0,238 |
| | 3 | 2,71 | 0,47 | 0,68 | 1,57 | 4,76 | Логнормальное | 0,118 | 0,551 | 0,635 |
| | 4 | 2,74 | 1,61 | 1,27 | 1,12 | 8,64 | Эмпирическое | - | - | 0,796 |
| | 5 | 2,83 | 1,51 | 1,23 | 1,28 | 6,13 | Эмпирическое | - | - | 0,737 |
| | Колонное движение | 3,09 | 2,563 | 1,601 | 0,76 | 7,51 | Логнормальное | 0,263 | - | 0,751 |
| Только правое от зеленого | 1 | 3,87 | 11,552 | 3,39 | 0,08 | 18,41 | Логнормальное | 0,32 | 0,006 | 0,00000237 |
| | 2 | 3,10 | 1,534 | 1,23 | 0,01 | 6,70 | Эмпирическое | - | 10,387 | 0,043 |
| | 3 | 3,49 | 30,750 | 5,54 | 1,51 | 39,32 | Логнормальное | 0,105 | 1,145 | 0,287 |
| | 4 | 2,98 | 1,445 | 1,20 | 1,52 | 6,79 | Логнормальное | 0,789 | -0,797 | 0,000146 |
| | 5 | 2,60 | 1,751 | 1,32 | 0,65 | 7,83 | Логнормальное | 0,41 | 2,131 | 0,001397 |
| | Колонное движение | 2,67 | 3,717 | 1,92 | 1,04 | 16,38 | Эмпирическое | 0,0038 | 5,209 | 0,293 |

| Направление | Номер интервала | Математическое ожидание длины интервала, с | Дисперсия | Среднеквадратическое отклонение | Минимальное значение, с | Максимальное значение, с | Рекомендуемое распределение | <i>p</i> -значение критерия Пирсона | Значение критерия Романовского (<i>R</i>) | <i>P</i> -значение дисперсионного анализа |
|-----------------------------|-------------------|--|-----------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|---|
| Прямо и лево от желтого | 1 | 3,53 | 2,388847 | 1,54 | 1,11 | 6,81 | Нормальное | 0,192 | 0,494 | 0,123 |
| | 2 | 2,74 | 0,667158 | 0,81 | 1,32 | 5,46 | Нормальное | 0,297 | 0,21 | 0,154 |
| | 3 | 2,66 | 1,343465 | 1,15 | 1,35 | 5,91 | Эмпирическое | – | – | 0,342 |
| | 4 | 2,50 | 0,789254 | 0,88 | 1,12 | 4,98 | Нормальное | 0,379 | – 0,159 | 0,112 |
| | 5 | 2,38 | 0,790423 | 0,88 | 1,41 | 5,31 | Нормальное | 0,072 | 1,576 | 0,245 |
| | Колонное движение | 2,24 | 0,606178 | 0,77 | 0,71 | 5,44 | Логнормальное | 0,371 | – | 0,505 |
| Прямо и направо от зеленого | 1 | 3,12 | 2,474772 | 1,57 | 0,25 | 8,12 | Нормальное | 0,13 | 3,01581 | 0,205356 |
| | 2 | 2,63 | 0,477011 | 0,69 | 0,59 | 4,88 | Нормальное | 0,199 | 0,115 | 0,098393 |
| | 3 | 2,52 | 0,585293 | 0,76 | 1,18 | 5,66 | Нормальное | 0,396 | – 0,075 | 0,055672 |
| | 4 | 2,65 | 0,993949 | 0,99 | 1,39 | 7,15 | Логнормальное | 0,51 | – 0,325 | 0,285101 |
| | 5 | 2,42 | 0,301626 | 0,54 | 1,40 | 3,75 | Логнормальное | 0,783 | – 0,65407 | 0,358443 |
| | Колонное движение | 2,44 | 0,598771 | 0,77 | 1,15 | 6,15 | Логнормальное | 0,06 | 1,79 | 0,68647 |
| Только прямо от желтого | 1 | 3,64 | 1,825097 | 1,35 | 0,05 | 6,51 | Нормальное | 0,97535 | – 1,13751 | 0,511937 |
| | 2 | 2,74 | 1,745826 | 1,32 | 1,22 | 8,78 | Логнормальное | 0,36104 | 0,018775 | 0,215039 |
| | 3 | 2,36 | 0,871241 | 0,93 | 1,28 | 5,22 | Эмпирическое | 0,00944 | 3,662315 | 0,219208 |
| | 4 | 2,48 | 1,451548 | 1,20 | 1,15 | 8,64 | Логнормальное | 0,02743 | 2,508404 | 0,445755 |

Окончание таблицы 3.5

| Направление | Номер интер-вала | Математическое ожидание длины интер-вала, с | Дисперсия | Среднеквадратическое отклонение | Минимальное значение, с | Максимальное значение, с | Рекомендуемое распределение | <i>p</i> -значение критерия Пирсона | Значение критерия Романовского (<i>R</i>) | <i>P</i> -значение дисперсионного анализа |
|---------------------------|-------------------|---|-----------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|---|
| | 5 | 2,13 | 0,740875 | 0,86 | 0,91 | 5,02 | Логнормальное | 0,02384 | 2,73631 | 0,34427 |
| | Колонное движение | 2,27 | 1,791993 | 1,33 | 0,13 | 10,56 | Логнормальное | 0,0058 | 4,145 | 0,084622 |
| Только налево от зеленого | 1 | 2,17 | | 0,60 | 1,13 | 2,61 | – | – | – | – |
| | 2 | 1,69 | | 0,63 | 0,75 | 2,51 | – | – | – | – |
| | 3 | 3,93 | | 1,45 | 2,4 | 5,74 | – | – | – | – |
| | 4 | 2,41 | | 1,67 | 0,12 | 4,65 | – | – | – | – |
| | 5 | 4,61 | | 1,6 | 2,79 | 6,21 | – | – | – | – |
| | Колонное движение | 2,66 | | 1,41 | 0,19 | 8,64 | – | – | – | – |

3.2 Определение значения граничного интервала

Для определения размеров граничного интервала, а также интервалов следования из очереди А.Г. Левашев [41, 40] и А.С. Липницкий [42] указывают на существование двух групп методов: первая группа предполагает регрессионный анализ количества водителей, принявших интервал, вторая группа определяет граничный интервал и интервал следования из очереди отдельно друг от друга. Рассматривая сравнение существующих методов определения граничного интервала, проведенное Brilon, Koenig, Troutbeck [117], на основе работ таких авторов, как Siegloch [126], Raff, Hart [125], Hewitt (Probit-анализ) [122], Harders [120, 121, 118, 123, 127], Troutbeck [128], Ashworth [115, 116], А.С. Липницкий и А.Г. Левашев устанавливают, что методики, разработанные Hewitt, Troutbeck и Siegloch, дают наиболее точный результат. При этом методику, которую разработал Hewitt, сложно применить на практике, и, в литературе она описана мало. Больше всего из регрессионных методов оценки соответствует действительности методика, разработанная Siegloch. Однако, для ее использования необходимо наличие постоянной очереди на пересечении на второстепенном направлении и, ее выполнение, требует больших трудозатрат.

Таким образом, исследователи сделали вывод, что наибольшей точностью результата и наименьшими трудозатратами обладают методики разработанные Troutbeck, и, использующая метод максимального правдоподобия, (Maximum-Likelihood-Method) [40–42].

Определение граничных интервалов с помощью метода максимального правдоподобия предполагает определение вероятности, при которой происходит попадание граничного интервала определенного транспортного средства в диапазон между принятым интервалом (a_i) и отклоненным интервалом (r_i). Данная вероятность определится из разницы вероятностей $F(a_i) - F(r_i)$. При этом r_i – это наибольший из отклоненных одним транспортным средством интервалов. Для всех рассмотренных транспортных средств, которые отклонили хотя бы один временной, определяется функция вероятности:

$$L^* = \prod_{i=1}^n [F(a_i) - F(r_i)], \quad (3.7)$$

где L^* – функция вероятности; $F(x)$ – функция распределения; a_i – интервал, принятый i -м транспортным средством; r_i – максимальный интервал, отклоненный i -м транспортным средством; n – количество рассмотренных транспортных средств; i – порядковый номер транспортного средства.

От этой функции возьмем логарифм:

$$L = \sum_{i=1}^n \ln [F(a_i) - F(r_i)]. \quad (3.8)$$

Таким образом, для одинаковых значений μ и σ максимум L и L^* достигается только при постоянно возрастающей логарифмической функции. Для максимума L , значения параметров μ и σ определяются по следующим зависимостям:

$$\frac{\partial F(r_i)}{\partial x} = -f(r_i), \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \sigma^2} = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{\partial F(a_i)}{\partial \sigma^2} - \frac{\partial F(r_i)}{\partial \sigma^2}}{F(a_i) - F(r_i)} = \sum_{i=1}^n \frac{(a_i - \bar{\mu})f(a_i) - (r_i - \bar{\mu})f(r_i)}{F(a_i) - F(r_i)} = 0, \quad (3.10)$$

где $\frac{\partial F(r_i)}{\partial x} = -f(r_i)$ и $\frac{\partial F(r_i)}{\partial x} = -\frac{x - \mu}{2\sigma^2} f(r_i)$.

Для решения представленной системы равенств Troutbeck предложил вначале задавать значения параметра σ^2 для определения параметра μ , а затем для определения μ задавать σ^2 . Решение считается найденным в том случае, когда оценки параметров варьируются незначительно. Представленная процедура может осуществляться с помощью надстройки «Поиск решения» в MS Excel. Значения основных параметров распределения граничных интервалов – математического ожидания m и среднеквадратического отклонения s^2 , определяется по зависимостям:

$$m = e^{\mu + 0,5\sigma^2} \lim_{x \rightarrow \infty}, \quad (3.11)$$

$$s^2 = m^2 (e^{\sigma^2} - 1). \quad (3.12)$$

При определении величины граничного интервала попарно выбираются значения самого большого отклоненного и принятого интервала последовательно

для каждого транспортного средства. Если рассматриваемое транспортное средство не отклонило ни одного интервала, то в расчете оно не учитывается [129]. Так же не учитываются пары значений в случае, если значение отклоненного интервала меньше принятого. В дальнейшем функцию распределения как отклоненных интервалов, там и функцию распределения принятых интервалов сопоставляют, для логорифмического распределения определяют значения параметров. В итоге, полученное значение математического ожидания будет соответствовать значению граничного.

Выводы к главе 3

1. Установлено, что риск ДТП, допускаемый водителями в Свердловской области равен $r = 0,001183$ при средней величине интервала между автомобилями в заторе 2,9 м.

2. Определено, что для адекватного описания движения автомобилей на регулируемом пересечении необходимо первые пять временных интервалов между транспортными средствами после начала цикла светофора описывать по отдельности, оставшиеся же объединить в колонное движение.

3. Установлены точечные статистические оценки по каждому из предлагаемых интервалов для всех возможных направлений регулируемого пересечения автомобильных дорог в Свердловской области. Рекомендованы функции распределения временных интервалов как стандартные, так и эмпирические.

4. Исследовано использование второго желтого сигнала цикла светофора на регулируемых пересечениях Свердловской области. Рекомендованы эмпирические функции распределения для определения количества транспортных средств, использующих второй желтый сигнал.

5. Выявлено, что на типовых пересечениях фактический состав потока не оказывает существенного влияния на приведенный поток из легковых автомобилей, за исключением правого поворота, что подтверждается результатами дисперсионного анализа.

4 ПРОВЕДЕНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1 Методика проведения имитационных экспериментов

В исследовании имитировалось функционирование транспортных потоков на пересечении в течение 3600 с модельного времени. В качестве входных параметров использовались интенсивности движения как главной, так и второстепенной дороги, их значения перебирались в ходе моделирования. Текущее модельное время фиксировалось заявкой при входе в очередь и при выходе из нее. В блоке sink происходило вычисление времени задержки текущей заявки, которое фиксировалось в наборе данных и выдавалось на диаграмму. Также каждые десять секунд модельного времени фиксировалась длина очереди и по ней строилась диаграмма. В дальнейшем данные экспортировались в MS Excel и Statistica для определения точечных оценок распределения, подбора функции распределения и др.

Для имитации появления заявки ТС использовались внутренние функции Anylogic. Входящие потоки моделировались в соответствии со значениями, полученными в ходе обследования транспортных потоков Свердловской области. Кроме того, при моделировании учитывались особенности как регулируемых, так и не регулируемых пересечений.

Для регулируемых пересечений установлены следующие параметры цикла работы светофора (продолжительность): желтого сигнала – 5 с, красного сигнала – 40, 90 и 60 с, зеленого сигнала – 20, 45 и 30 с.

Схема движения – двух фазная, с конфликтным левым направлением, кроме того, моделировалось использование второго желтого сигнала. Для этого генерировалось равномерно распределенное число в интервале от нуля до единицы и в соответствии с полученными функциями распределения (таблица 3.4) устанавливалось количество ТС, проходящих на второй желтый сигнал. Время их задержки

на стоп-линии или в условном створе устанавливалось равным среднему времени колонного движения для данного типового направления.

Для нерегулируемых пересечений в соответствии с методом Монте-Карло и алгоритмом, представленном на рисунке 4.1, разыгрывались значения граничного интервала.

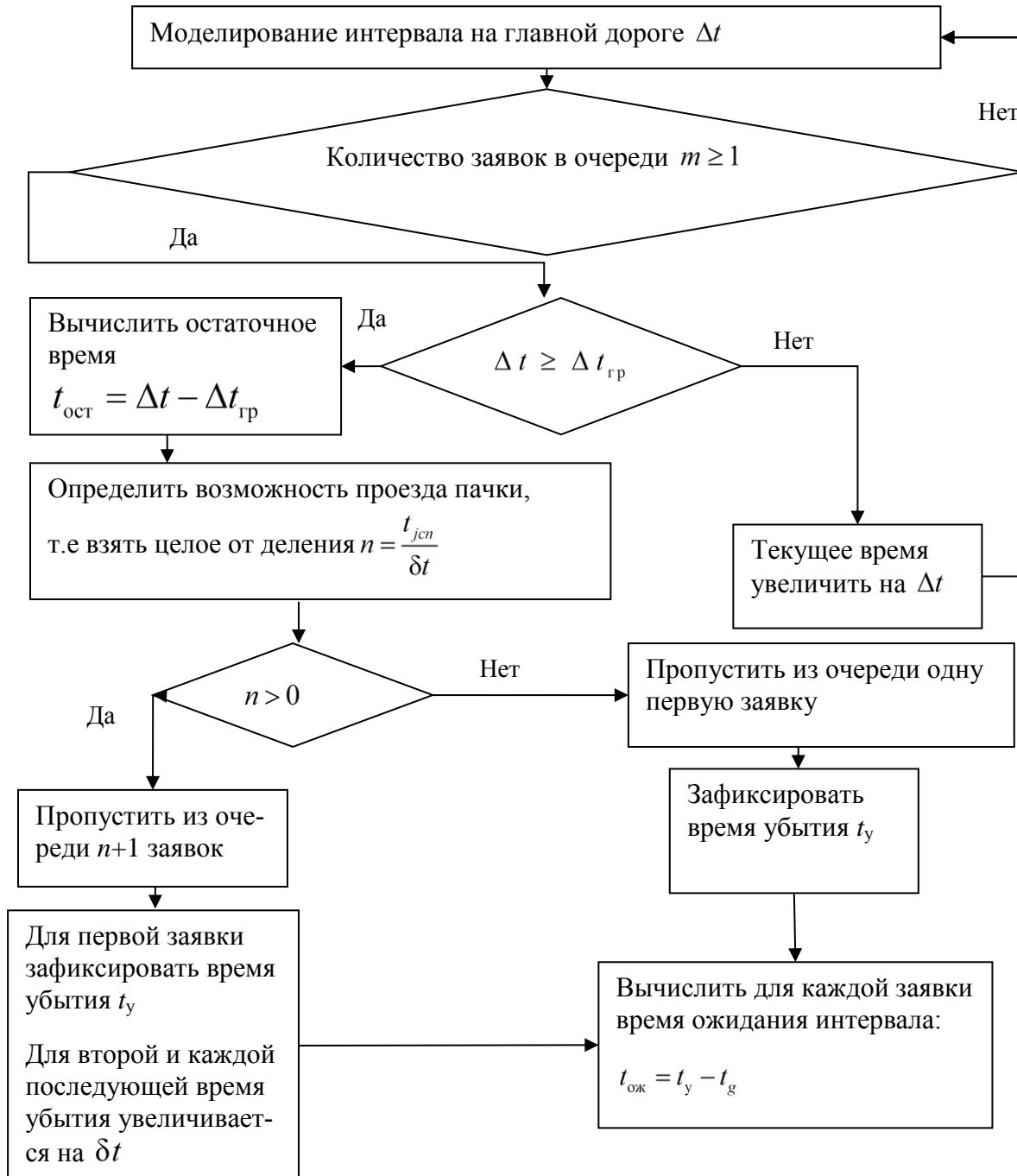


Рисунок 4.1 – Моделирование выбора безопасного интервала автомобилями из очереди

Для установления значений граничного интервала некоторые параметры уточнялись с использованием нормативной литературы [51, 52] (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Нормативные параметры модели для нерегулируемых пересечений

| Параметр | Значение параметра для пересечения типа | | | |
|---|---|----------------|-----------------------|---------------|
| | нерегулируемое в одном уровне | | транспортная развязка | |
| | прямо и налево | правый поворот | правый поворот | левый поворот |
| v_1 – скорость движения по главной дороге, км/ч | 80 | 80 | 80 | 50 |
| v_2 – начальная скорость движения автомобиля, совершающего маневр пересечения главной дороги, км/ч | 5 | 5 | 5 | 5 |
| v_k – скорость движения того же автомобиля в конфликтной точке, км/ч | 80 | 80 | 80 | 50 |
| α – угол между векторами скоростей основного и второстепенного направлений. Устанавливается в момент пересечения конфликтной точки | Прямо 90° , налево 0° | 0° | 0° | 0° |

Скорость движения по главной дороге принята в соответствии с [51], она равна скорости организации движения и составляет 0,7 от расчетной скорости. Для левоповоротного съезда с транспортной развязки учтено, что наличие зоны переплетения снижает скорость движения как на главной дороге, так и на самом съезде. Скорость движения автомобиля в конфликтной точке принята равной скорости движения на главной дороге, т.к. сравнивается движение транспортных потоков на типовых пересечениях, а строгое соответствие нормативной документации обеспечивает указанную скорость слияния. Так, нормативные требования к переходно-скоростной полосе для правого поворота обеспечивают разгон транспортного средства от 5 до 80 км/ч, как для нерегулируемых пересечений, так и для транспортных развязок. Таким образом, результаты моделирования в обоих случаях будут одинаковыми.

Аналогично, соблюдение нормативных требований обеспечит минимальный угол при слиянии транспортных потоков, равный нулю.

4.2 Результаты имитационного моделирования и их анализ

В результате проведения имитационного моделирования получены следующие результаты по средней задержке в очереди, средней длине очереди и практической пропускной способности, приведенной к легковому потоку автомобилей. Примеры расчетов представлены в таблицах 4.2–4.7.

Таблица 4.2 – Средняя задержка транспорта в очереди на правом повороте нерегулируемого пересечения

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Интенсивность крайней полосы главной дороги, авт./ч | | | | | | | | |
|--|---|------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 |
| 200 | 6,97 | 5,16 | 8,52 | 6,96 | 12,50 | 9,73 | 10,83 | 8,14 | 15,43 |
| 400 | – | 7,01 | 7,21 | 22,45 | 10,35 | 8,43 | 14,81 | 17,14 | 12,80 |
| 600 | – | – | 23,76 | 42,36 | 83,75 | 176,70 | 34,79 | 99,75 | 89,82 |
| 800 | – | – | – | 48,95 | 166,78 | 153,66 | 124,07 | 595,68 | 428,68 |
| 1000 | – | – | – | – | 443,59 | 590,81 | 380,23 | 635,08 | 728,43 |
| 1200 | – | – | – | – | – | 838,17 | 736,45 | 870,29 | 770,08 |
| 1400 | – | – | – | – | – | – | 1071,9 | 1055,44 | 1023,54 |
| 1600 | – | – | – | – | – | – | – | 1237,68 | 1313,82 |
| 1800 | – | – | – | – | – | – | – | – | 1414,27 |

Таблица 4.3 – Средняя длина очереди на правом повороте нерегулируемого пересечения

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Интенсивность крайней полосы главной дороги, авт./ч | | | | | | | | |
|--|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 |
| 200 | 0,43 | 0,29 | 0,46 | 0,36 | 0,70 | 0,56 | 0,58 | 0,49 | 0,80 |
| 400 | – | 0,83 | 0,75 | 2,72 | 1,14 | 0,94 | 1,77 | 1,99 | 1,60 |

Окончание таблицы 4.3

| | | | | | | | | | |
|------|---|---|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 600 | – | – | 4,00 | 7,08 | 14,06 | 30,35 | 5,75 | 16,75 | 15,30 |
| 800 | – | – | – | 10,97 | 39,13 | 32,61 | 28,40 | 122,89 | 100,25 |
| 1000 | – | – | – | – | 130,77 | 168,75 | 104,70 | 181,49 | 189,26 |
| 1200 | – | – | – | – | – | 254,17 | 235,93 | 288,51 | 265,57 |
| 1400 | – | – | – | – | – | – | 428,15 | 413,84 | 411,52 |
| 1600 | – | – | – | – | – | – | – | 562,00 | 554,64 |
| 1800 | – | – | – | – | – | – | – | – | 677,13 |

Таблица 4.4 – Практическая пропускная способность правого поворота, приведенная к легковому потоку автомобилей

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Интенсивность крайней полосы главной дороги, авт./ч | | | | | | | | |
|--|---|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 |
| 200 | 218 | 195 | 198 | 190 | 205 | 199 | 194 | 215 | 190 |
| 400 | – | 418 | 380 | 437 | 400 | 401 | 428 | 417 | 437 |
| 600 | – | – | 599 | 602 | 606 | 617 | 557 | 585 | 606 |
| 800 | – | – | – | 796 | 741 | 754 | 703 | 583 | 659 |
| 1000 | – | – | – | – | 714 | 686 | 744 | 611 | 603 |
| 1200 | – | – | – | – | – | 705 | 729 | 639 | 617 |
| 1400 | – | – | – | – | – | – | 652 | 572 | 537 |
| 1600 | – | – | – | – | – | – | – | 583 | 544 |
| 1800 | – | – | – | – | – | – | – | – | 510 |

Таблица 4.5 – Результаты имитационного моделирования правого поворота регулируемого пересечения ($T_{ц} = 70$ с, зеленый – 20 с)

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Средняя задержка транспорта, с | Средняя длина очереди | Практическая пропускная способность приведенного потока легковых автомобилей авт./ч |
|--|--------------------------------|-----------------------|---|
| 100 | 14,35 | 0,53 | 100 |
| 200 | 31,89 | 2,12 | 206 |

Окончание таблицы 4.5

| | | | |
|------|---------|--------|-----|
| 300 | 39,46 | 3,44 | 278 |
| 400 | 233,30 | 23,48 | 322 |
| 500 | 681,94 | 96,47 | 296 |
| 600 | 887,62 | 145,47 | 357 |
| 700 | 1037,10 | 199,88 | 336 |
| 800 | 979,22 | 194,45 | 337 |
| 900 | 1133,11 | 296,94 | 327 |
| 1000 | 1220,61 | 337,27 | 315 |
| 1100 | 1274,08 | 388,06 | 336 |
| 1200 | 1431,49 | 473,60 | 309 |
| 1300 | 1343,20 | 472,35 | 321 |
| 1400 | 1401,96 | 549,12 | 340 |

Таблица 4.6 – Результаты имитационного моделирования правого поворота регулируемого пересечения ($T_{ц} = 145$ с, зеленый – 45 с)

| Интенсивность второстепенного направления, авт./ч | Средняя задержка транспорта, с | Средняя длина очереди, м | Практическая пропускная способность приведенного потока легковых автомобилей, авт./ч |
|---|--------------------------------|--------------------------|--|
| 100 | 38,39 | 1,35 | 112 |
| 200 | 53,76 | 3,67 | 220 |
| 300 | 496,75 | 42,52 | 265 |
| 400 | 907,22 | 100,53 | 243 |
| 500 | 887,70 | 123,72 | 256 |
| 600 | 1002,71 | 156,06 | 259 |
| 700 | 1142,21 | 216,84 | 269 |
| 800 | 1314,51 | 282,70 | 270 |
| 900 | 1396,67 | 345,82 | 245 |
| 1000 | 1392,09 | 376,12 | 275 |
| 1100 | 1367,65 | 396,42 | 275 |

Окончание таблицы 4.6

| Интенсивность второстепенного направления, авт./ч | Средняя задержка транспорта, с | Средняя длина очереди, м | Практическая пропускная способность приведенного потока легковых автомобилей, авт./ч |
|---|--------------------------------|--------------------------|--|
| 1200 | 1497,70 | 490,93 | 263 |
| 1300 | 1409,96 | 532,53 | 249 |
| 1400 | 1481,55 | 539,99 | 249 |
| 1500 | 1478,59 | 643,52 | 261 |
| 1600 | 1610,36 | 668,15 | 278 |
| 1700 | 1496,59 | 698,84 | 262 |
| 1800 | 1561,30 | 778,11 | 276 |
| 1900 | 1047,67 | 587,30 | 182 |

Таблица 4.7 – Результаты имитационного моделирования правого поворота регулируемого пересечения ($T_{ц} = 100$ с, зеленый – 30 с)

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Средняя задержка транспорта, с | Средняя длина очереди | Практическая пропускная способность приведенного потока легковых автомобилей авт./ч |
|--|--------------------------------|-----------------------|---|
| 100 | 33,07 | 0,92 | 88 |
| 200 | 26,93 | 1,62 | 185 |
| 300 | 71,96 | 6,21 | 275 |
| 400 | 610,79 | 74,88 | 290 |
| 500 | 835,29 | 123,61 | 282 |
| 600 | 1049,18 | 175,91 | 299 |
| 700 | 1113,23 | 223,15 | 283 |
| 800 | 1069,53 | 241,47 | 299 |
| 900 | 1394,15 | 318,90 | 282 |
| 1000 | 1311 | 356,51 | 287 |
| 1100 | 1349,46 | 385,35 | 283 |
| 1200 | 1447,93 | 461,32 | 322 |

Примеры результатов имитационного эксперимента по времени развития представлены на рисунках 4.2–4.5.

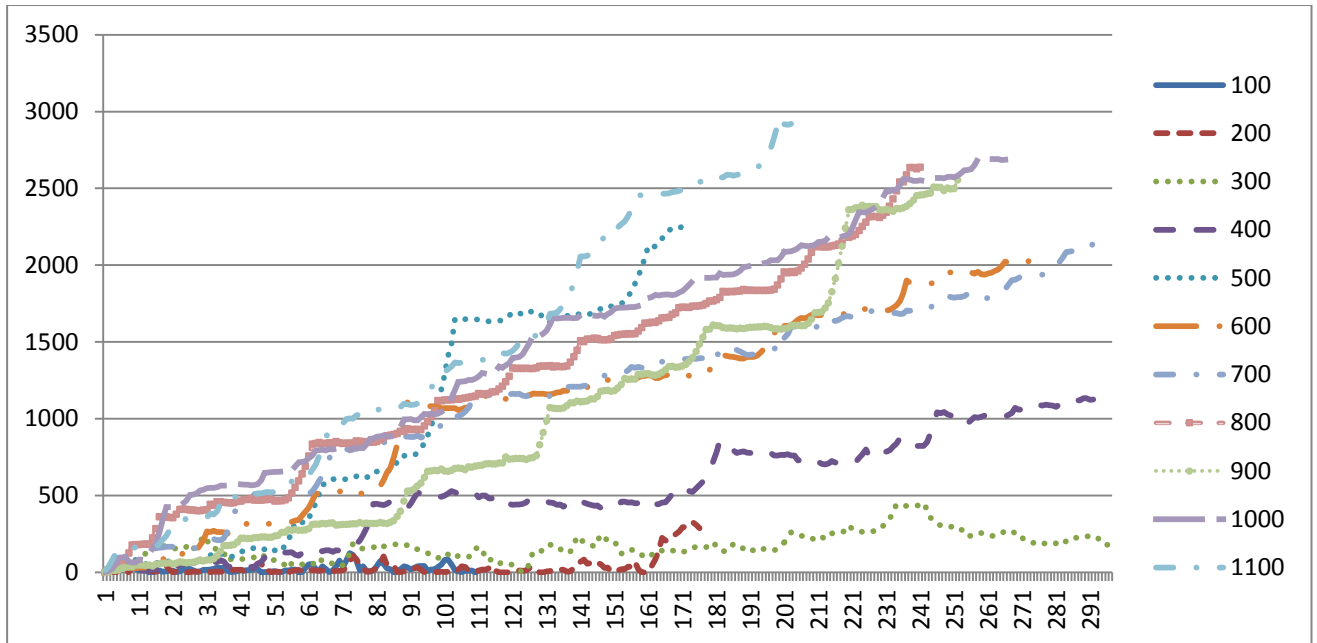


Рисунок 4.2 – Задержка транспорта на нерегулируемом пересечении для направления прямо-налево при интенсивности главной дороги, 2000 авт./ч

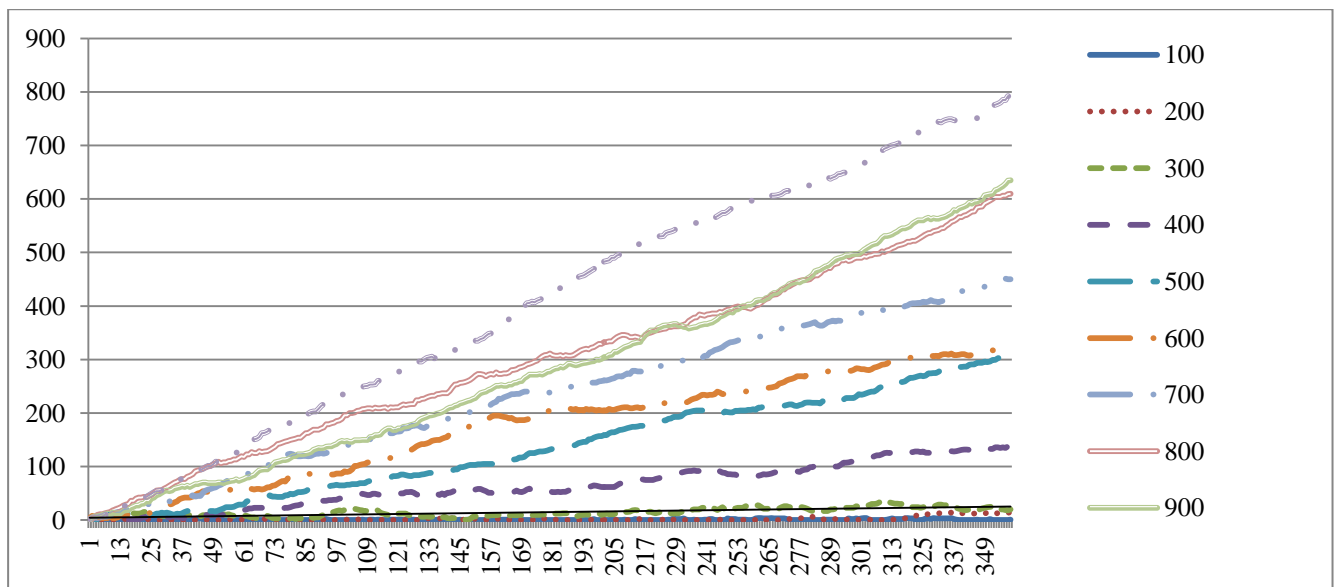


Рисунок 4.3 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом пересечении направление прямо-налево при интенсивности главной дороги, 100 авт./ч

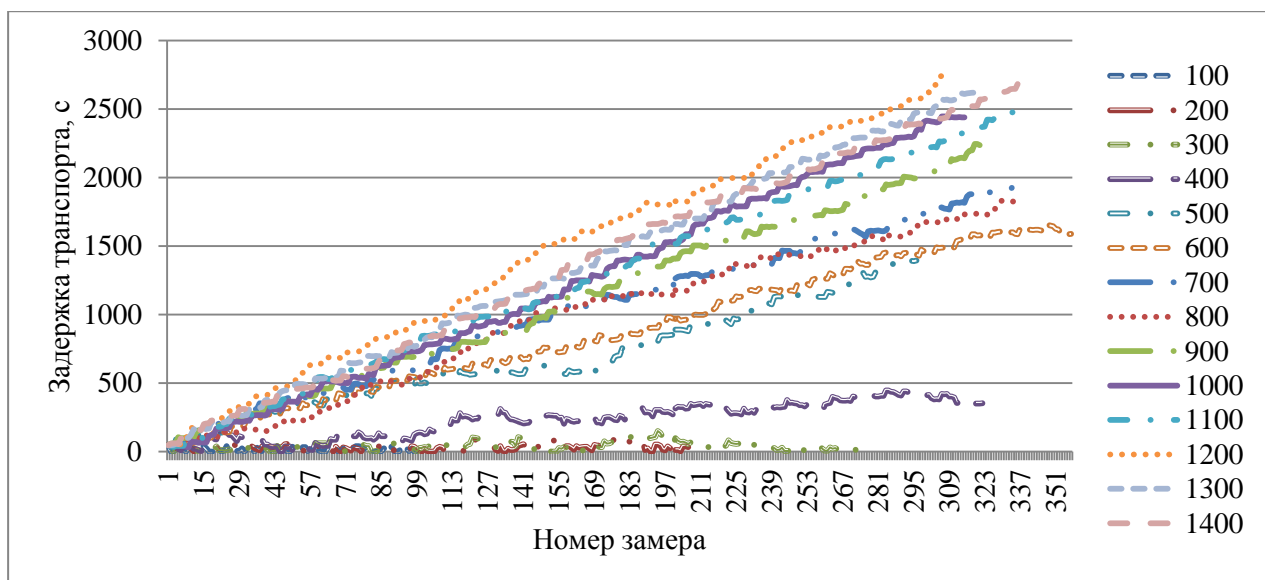


Рисунок 4.4 – Задержка транспорта на правом повороте регулируемого пересечения при $T_{ц} = 70$ с

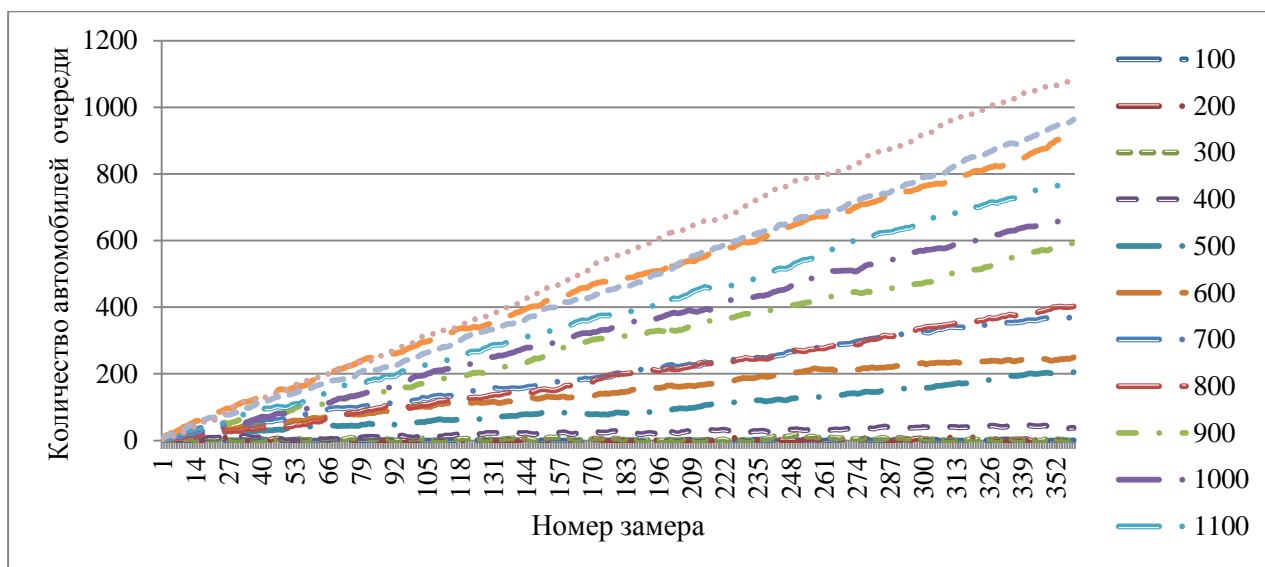


Рисунок 4.5 – Длина очереди на правом повороте регулируемого пересечения при $T_{ц} = 70$ с

Из полученных результатов видно, что при превышении предела пропускной способности начинается линейный рост задержки транспорта и длины очереди. Учитывая, что экспериментальные методы расчета средней задержки транспорта основаны на определении длины очереди, был проведен подбор регрессионных линейных зависимостей для случаев значения коэффициента загрузки

движением больше единицы и эмпирической функции распределения, для случаев загрузки движением меньше единицы (таблице 4.8)

Таблица 4.8 – Функция распределения вероятностей для длины очереди правого поворота при интенсивности крайней полосы главной дороги 2000 авт./ч

| Кол-во ТС в очереди | Интенсивность второстепенного направления, авт./ч | | | | |
|------------------------|---|-----|-----|-----|------|
| | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
| | Функция распределения вероятностей, % | | | | |
| 0 | 58 | 29 | 10 | 2 | 0 |
| 1 | 79 | 52 | 15 | 4 | 1 |
| 2 | 90 | 63 | 19 | 5 | 1 |
| 3 | 95 | 68 | 23 | 6 | 1 |
| 4 | 99 | 74 | 26 | 6 | 2 |
| 5 | 99 | 79 | 29 | 7 | 2 |
| 6 | 100 | 81 | 32 | 8 | 2 |
| 7 | 100 | 84 | 37 | 9 | 2 |
| 8 | 100 | 86 | 42 | 10 | 2 |
| 9 | 100 | 89 | 46 | 11 | 3 |
| 10 | 100 | 93 | 48 | 12 | 3 |
| 11 | 100 | 95 | 51 | 12 | 3 |
| 12 | 100 | 97 | 53 | 12 | 3 |
| 13 | 100 | 99 | 54 | 13 | 3 |
| 14 | 100 | 99 | 54 | 13 | 3 |
| 15 | 100 | 99 | 57 | 13 | 5 |

Из таблицы 4.8 видно, что с ростом интенсивности движения вероятность отсутствия очереди снижается. Эта зависимость может быть описана регрессионной функцией и, следовательно, определена интенсивность, при которой вероятность отсутствия очереди равна нулю. Данную величину предлагается называть пределом пропускной способности пересечения. В дальнейшем зависимость для

определения предела пропускной способности будет включаться в общую таблицу регрессионных зависимостей (таблицы 4.9–4.13).

4.3 Анализ результатов имитационного моделирования

Таблица 4.9 – Уравнения регрессии длины очереди для левоповоротного съезда

| Интенсивность второстепенной дороги авт./ч | Интенсивность главной дороги, авт./ч | | | Уравнение регрессии для определения предела пропускной способности |
|--|--------------------------------------|----------------------|----------------------|--|
| | 700 | 900 | 1100 | |
| 100 | – | $y = 0,478x - 10,29$ | $y = 1,255x + 6,758$ | $y = -0,025x^2 - 0,106x + 0,913$ |
| | – | $R^2 = 0,964$ | $R^2 = 0,992$ | $R^2 = 1$ |
| 150 | $y = 0,125x + 1,966$ | $y = 0,628x - 8,223$ | $y = 0,959x + 8,531$ | $y = -0,066x^2 + 0,139x + 0,676$ |
| | $R^2 = 0,793$ | $R^2 = 0,978$ | $R^2 = 0,991$ | $R^2 = 1$ |
| 200 | – | $y = 0,489x + 2,476$ | $y = 0,994x - 7,403$ | $y = -0,171x + 0,942$ |
| | – | $R^2 = 0,983$ | $R^2 = 0,995$ | $R^2 = 1$ |
| 250 | – | $y = 0,924x + 1,919$ | $y = 0,252x + 24,36$ | $y = -0,072x^2 + 0,146x + 0,676$ |
| | – | $R^2 = 0,990$ | $R^2 = 0,942$ | $R^2 = 0,999$ |
| 300 | – | $y = 0,380x + 6,736$ | $y = 1,023x - 1,595$ | $y = -0,096x^2 + 0,255x + 0,607$ |
| | – | $R^2 = 0,961$ | $R^2 = 0,997$ | $R^2 = 0,960$ |
| 350 | – | $y = 0,162x + 11,41$ | $y = 0,828x + 0,914$ | $y = -0,091x^2 + 0,251x + 0,543$ |
| | – | $R^2 = 0,854$ | $R^2 = 0,990$ | $R^2 = 0,995$ |
| 400 | – | $y = 0,513x - 10,21$ | $y = 0,851x - 5,012$ | $y = -0,096x^2 + 0,269x + 0,573$ |
| | – | $R^2 = 0,986$ | $R^2 = 0,991$ | $R^2 = 0,999$ |
| 450 | – | $y = 0,255x - 2,226$ | $y = 0,822x + 9,890$ | $y = -0,091x^2 + 0,237x + 0,588$ |
| | – | $R^2 = 0,953$ | $R^2 = 0,994$ | $R^2 = 0,976$ |
| 500 | – | $y = 0,259x + 4,236$ | – | $y = -0,034x^2 - 0,029x + 0,836$ |
| | – | $R^2 = 0,931$ | – | $R^2 = 0,991$ |
| 550 | – | $y = 0,184x - 4,240$ | $y = 0,634x + 0,868$ | $y = -0,048x^2 + 0,031x + 0,775$ |
| | – | $R^2 = 0,816$ | $R^2 = 0,986$ | $R^2 = 0,970$ |

Таблица 4.10 – Уравнения регрессии длины очереди для правого поворота
нерегулируемого пересечения

| Интенсивность второ- степенного направле- ния, авт./ч | Интенсивность крайней полосы главной дороги, авт./ч | | | | Уравнение ре- грессии для определения предела про- пускной спо- собности |
|---|---|----------------------|----------------------|----------------------|---|
| | 1600 | 1900 | 2200 | 2500 | |
| 250 | $y = 0,730x + 9,279$ | $y = 1,407x + 9,928$ | $y = 2,237x - 9,043$ | $y = 2,734x + 13,16$ | $y = -0,056x^2 + 0,147x + 0,78$ |
| | $R^2 = 0,984$ | $R^2 = 0,995$ | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 0,988$ |
| 500 | $y = 0,398x - 2,561$ | $y = 1,187x - 11,52$ | $y = 1,804x + 4,696$ | $y = 2,290x - 14,44$ | $y = -0,070x^2 + 0,231x + 0,757$ |
| | $R^2 = 0,979$ | $R^2 = 0,996$ | $R^2 = 0,997$ | $R^2 = 0,995$ | $R^2 = 0,991$ |
| 750 | $y = 0,267x - 8,292$ | $y = 0,925x - 6,053$ | $y = 1,761x + 5,406$ | $y = 2,251x + 12,40$ | $y = -0,030x^2 + 0,042x + 0,932$ |
| | $R^2 = 0,901$ | $R^2 = 0,990$ | $R^2 = 0,996$ | $R^2 = 0,997$ | $R^2 = 0,996$ |
| 1000 | – | $y = 0,533x - 2,671$ | $y = 1,158x + 9,538$ | $y = 1,958x + 26,35$ | $y = -0,033x^2 + 0,101x + 0,860$ |
| | – | $R^2 = 0,981$ | $R^2 = 0,993$ | $R^2 = 0,991$ | $R^2 = 0,978$ |
| 1250 | – | $y = 0,315x - 13,55$ | $y = 0,771x + 4,396$ | $y = 1,609x - 3,049$ | $y = -0,043x^2 + 0,181x + 0,749$ |
| | – | $R^2 = 0,914$ | $R^2 = 0,979$ | $R^2 = 0,989$ | $R^2 = 0,981$ |
| 1500 | – | – | $y = 0,442x + 16,03$ | $y = 1,217x + 2,024$ | $y = -0,028x^2 + 0,091x + 0,856$ |
| | – | – | $R^2 = 0,972$ | $R^2 = 0,994$ | $R^2 = 0,994$ |
| 1750 | – | – | $y = 0,321x + 28,31$ | $y = 0,944x + 10,61$ | $y = -0,032x^2 + 0,123x + 0,813$ |
| | – | – | $R^2 = 0,794$ | $R^2 = 0,957$ | $R^2 = 0,996$ |
| 2000 | – | – | $y = 0,383x + 19,49$ | $y = 0,959x - 19,43$ | $y = -0,023x^2 + 0,057x + 0,888$ |
| | – | – | $R^2 = 0,962$ | $R^2 = 0,984$ | $R^2 = 0,981$ |
| 2250 | – | – | $y = 0,542x - 1,918$ | $y = 1,133x + 26,66$ | $y = -0,034x^2 + 0,063x + 0,869$ |
| | – | – | $R^2 = 0,965$ | $R^2 = 0,990$ | $R^2 = 0,994$ |

Таблица 4.11 – Уравнения регрессии длины очереди для направления
прямо-налево нерегулируемого пересечения

| Интенсивность второстепенного направления, авт./ч | Интенсивность главной дороги авт./ч | | | | Уравнение ре- грессии для опре- деления предела пропускной спо- собности |
|--|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--|
| | 600 | 850 | 1100 | 1350 | |
| 100 | $y = 0,267x - 3,485$ | $y = 0,926x + 0,019$ | $y = 1,662x - 4,488$ | $y = 2,286x - 21,35$ | $y = -0,39x + 1,030$ |
| | $R^2 = 0,948$ | $R^2 = 0,990$ | $R^2 = 0,997$ | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 1$ |
| 350 | – | $y = 0,563x - 3,675$ | $y = 1,298x - 2,423$ | $y = 1,79x - 15,54$ | $y = -0,085x^2 + 0,068x + 0,763$ |
| | – | $R^2 = 0,984$ | $R^2 = 0,991$ | $R^2 = 0,996$ | $R^2 = 1$ |
| 500 | – | $y = 0,130x - 6,567$ | $y = 0,734x + 3,553$ | $y = 1,495x - 13,29$ | $y = -0,039x^2 - 0,044x + 0,869$ |
| | – | $R^2 = 0,601$ | $R^2 = 0,995$ | $R^2 = 0,993$ | $R^2 = 1$ |
| 700 | – | – | $y = 0,737x + 8,014$ | $y = 1,103x - 9,808$ | $y = -0,022x^2 - 0,097x + 0,917$ |
| | – | – | $R^2 = 0,989$ | $R^2 = 0,993$ | $R^2 = 0,991$ |
| 900 | – | – | $y = 0,368x + 16,43$ | $y = 0,952x + 5,707$ | $y = -0,084x^2 + 0,208x + 0,656$ |
| | – | – | $R^2 = 0,941$ | $R^2 = 0,994$ | $R^2 = 0,995$ |
| 1100 | – | – | $y = 1,077x - 13,32$ | $y = 0,400x + 1,031$ | $y = -0,058x^2 + 0,054x + 0,844$ |
| | – | – | $R^2 = 0,993$ | $R^2 = 0,950$ | $R^2 = 0,999$ |

Таблица 4.12 – Уравнения регрессии для регулируемых пересечений
по направлению прямо-налево

| Интенсивность второсте- пенного направления авт./ч | Параметры цикла светофора (длительность зеленого – время цикла), с | | |
|--|---|----------------------|----------------------|
| | 20–70 | 45–145 | 30–100 |
| 500 | | $y = 0,267x + 17,89$ | $y = 0,070x + 21,10$ |
| | | $R^2 = 0,948$ | $R^2 = 0,709$ |
| 600 | $y = 0,136x + 19,98$ | $y = 0,472x + 2,835$ | $y = 0,360x - 16,66$ |
| | $R^2 = 0,789$ | $R^2 = 0,972$ | $R^2 = 0,901$ |
| 700 | $y = 0,524x + 1,643$ | $y = 0,825x + 6,701$ | $y = 0,640x + 19,08$ |
| | $R^2 = 0,986$ | $R^2 = 0,994$ | $R^2 = 0,985$ |
| 800 | $y = 0,576x + 7,567$ | $y = 1,026x + 22,12$ | $y = 0,847x + 8,645$ |
| | $R^2 = 0,991$ | $R^2 = 0,991$ | $R^2 = 0,992$ |

Окончание таблицы 4.12

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Параметры цикла светофора (длительность зеленого – время цикла), с | | |
|--|---|-----------------------|-----------------------|
| | 20–70 | 45–145 | 30–100 |
| 900 | $y = 0,904x + 15,14$ | $y = 1,385x + 15,57$ | $y = 1,210x + 15,93$ |
| | $R^2 = 0,994$ | $R^2 = 0,994$ | $R^2 = 0,997$ |
| 1000 | $y = 1,316x + 10,08$ | $y = 1,636x + 11,67$ | $y = 1,568x + 11,23$ |
| | $R^2 = 0,996$ | $R^2 = 0,997$ | $R^2 = 0,998$ |
| 1100 | $y = 1,56x + 42,51$ | $y = 1,947x + 10,81$ | $y = 1,69x + 2,604$ |
| | $R^2 = 0,995$ | $R^2 = 0,996$ | $R^2 = 0,998$ |
| 1200 | $y = 1,824x - 4,070$ | $y = 2,177x + 0,523$ | $y = 2,044x + 1,874$ |
| | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 0,998$ |
| 1300 | $y = 2,048x + 21,05$ | – | – |
| | $R^2 = 0,997$ | – | – |
| 1400 | $y = 2,439x - 5,498$ | – | – |
| | $R^2 = 0,999$ | – | – |
| Уравнение регрессии для определения предела пропускной способности | $y = -0,154x + 0,856$ | $y = -0,158x + 0,668$ | $y = -0,162x + 0,753$ |
| | $R^2 = 0,974$ | $R^2 = 0,967$ | $R^2 = 0,975$ |

Таблица 4.13 – Уравнения регрессии для регулируемых пересечений
по направлению прямо-налево

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Параметры цикла светофора (время зеленого сигнала-время цикла), с | | |
|--|--|----------------------|----------------------|
| | 20–70 | 45–145 | 30–100 |
| 300 | – | $y = 0,142x + 16,89$ | – |
| | – | $R^2 = 0,915$ | – |
| 400 | $y = 0,121x + 1,552$ | $y = 0,473x + 15,30$ | – |
| | $R^2 = 0,929$ | $R^2 = 0,990$ | – |
| 500 | $y = 0,523x + 2,293$ | $y = 0,649x + 6,884$ | $y = 0,667x + 3,435$ |
| | $R^2 = 0,975$ | $R^2 = 0,992$ | $R^2 = 0,991$ |
| 600 | $y = 0,680x + 22,91$ | $y = 0,814x + 9,547$ | $y = 0,880x + 17,39$ |
| | $R^2 = 0,986$ | $R^2 = 0,996$ | $R^2 = 0,994$ |

Окончание таблицы 4.13

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Параметры цикла светофора (время зеленого сигнала-время цикла), с | | |
|--|--|-----------------------|-----------------------|
| | 20–70 | 45–145 | 30–100 |
| 700 | $y = 1,124x - 7,927$ | $y = 1,153x + 9,139$ | $y = 1,17x + 12,55$ |
| | $R^2 = 0,996$ | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 0,998$ |
| 800 | $y = 1,009x + 18,25$ | $y = 1,457x + 20,44$ | $y = 1,338x + 0,621$ |
| | $R^2 = 0,997$ | $R^2 = 0,995$ | $R^2 = 0,995$ |
| 900 | $y = 1,594x + 9,936$ | $y = 1,877x + 7,906$ | $y = 1,561x + 37,88$ |
| | $R^2 = 0,997$ | $R^2 = 0,996$ | $R^2 = 0,995$ |
| 1000 | $y = 1,895x - 3,874$ | $y = 1,977x + 20,21$ | $y = 1,951x + 5,274$ |
| | $R^2 = 0,999$ | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 0,998$ |
| 1100 | $y = 2,168x - 2,245$ | $y = 2,166x + 6,387$ | $y = 2,179x - 6,891$ |
| | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 0,997$ |
| 1200 | $y = 2,426x + 36,77$ | $y = 2,612x + 20,68$ | $y = 2,421x + 25,40$ |
| | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 0,999$ |
| 1300 | $y = 2,645x - 3,845$ | – | – |
| | $R^2 = 0,998$ | – | – |
| 1400 | $y = 3,068x - 3,115$ | – | – |
| | $R^2 = 0,999$ | – | – |
| Уравнение регрессии для определения предела пропускной способности | $y = -0,222x + 0,806$ | $y = -0,300x + 0,732$ | $y = -0,236x + 0,771$ |
| | $R^2 = 0,943$ | $R^2 = 1$ | $R^2 = 1$ |

В случае, когда значение коэффициента загрузки движением больше единицы, регрессионные зависимости длины очереди в подавляющем большинстве случаев хорошо описываются линейными функциями. Важно отметить, что наличие свободного члена в линейной функции указывает на наличие какой-то первоначальной очереди на пересечении. При этом для данных случаев известно, что первоначальная очередь есть, но её размер может быть самым различным. Таким образом, большое значение приобретает коэффициент перед x , который имеет смысл скорости нарастания очереди.

4.4 Построение итоговых зависимостей

Итоговые зависимости определяют коэффициенты скорости нарастания очереди в зависимости от интенсивностей пересекающихся потоков и зависимости для определения пределов пропускной способности. Предел пропускной способности определяется в каждом опыте на основании регрессионной зависимости как значение интенсивности движения главного потока, при которой вероятность отсутствия очереди равна нулю. В качестве расчетного предела пропускной способности выбираем среднее значение по всем проделанным имитационным экспериментам. Значения коэффициентов скорости нарастания очереди представлены в таблицах 4.14 – 4.18.

Таблица 4.14 – Коэффициенты скорости нарастания очереди для левоповоротного съезда

| Интенсивность движения на второстепенном направлении авт./ч | Интенсивность движения на крайней полосе главной дороги, авт./ч | | |
|---|---|-------|-------|
| | 700 | 900 | 1100 |
| 100 | – | 0,478 | 1,255 |
| 150 | 0,125 | 0,628 | 0,959 |
| 200 | – | 0,489 | 0,994 |
| 250 | – | 0,252 | 0,924 |
| 300 | – | 0,38 | 1,023 |
| 350 | – | 0,162 | 0,828 |
| 400 | – | 0,513 | 0,851 |
| 450 | – | 0,255 | 0,822 |
| 500 | – | 0,259 | |
| 550 | – | 0,184 | 0,634 |

Таблица 4.15 – Коэффициенты скорости нарастания очереди для правого поворота нерегулируемого пересечения

| Интенсивность движения на второстепенном направлении авт./ч | Интенсивность движения на крайней полосе главной дороги авт./ч | | | |
|---|--|-------|-------|-------|
| | 1600 | 1900 | 2200 | 2500 |
| 250 | 0,73 | 1,407 | 2,237 | 2,734 |
| 500 | 0,398 | 1,187 | 1,804 | 2,29 |
| 750 | 0,267 | 0,925 | 1,761 | 2,251 |
| 1000 | – | 0,533 | 1,158 | 1,958 |
| 1250 | – | 0,315 | 0,771 | 1,609 |
| 1500 | – | – | 0,442 | 1,217 |
| 1750 | – | – | 0,321 | 0,944 |
| 2000 | – | – | 0,383 | 0,959 |
| 2250 | – | – | 0,542 | 1,133 |

Таблица 4.16 – Коэффициенты скорости нарастания очереди для нерегулируемого пересечения направление прямо-налево

| Интенсивность движения второстепенного направления, авт./ч | Интенсивность главной дороги, авт./ч | | | |
|--|--------------------------------------|-------|-------|-------|
| | 600 | 850 | 1100 | 1350 |
| 100 | 0,267 | 0,926 | 1,662 | 2,286 |
| 350 | – | 0,563 | 1,298 | 1,79 |
| 500 | – | 0,13 | 0,734 | 1,495 |
| 700 | – | – | 0,737 | 1,103 |
| 900 | – | – | 0,368 | 0,952 |
| 1100 | – | – | 1,077 | 0,4 |

Таблица 4.17 – Коэффициенты скорости нарастания очереди
для регулируемого пересечения направление прямо-лево

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Практическая пропускная способность потока легковых автомобилей по направлению авт./ч | | |
|--|---|----------|---------|
| | 0,138286 | 0,149517 | 0,13981 |
| 500 | – | 0,267 | 0,07 |
| 600 | 0,136 | 0,472 | 0,36 |
| 700 | 0,524 | 0,825 | 0,64 |
| 800 | 0,576 | 1,026 | 0,847 |
| 900 | 0,904 | 1,385 | 1,21 |
| 1000 | 1,316 | 1,636 | 1,568 |
| 1100 | 1,56 | 1,947 | 1,69 |
| 1200 | 1,824 | 2,177 | 2,044 |
| 1300 | 2,048 | – | – |
| 1400 | 2,439 | – | – |

Таблица 4.18 – Коэффициенты скорости нарастания очереди для правого поворота регулируемого пересечения

| Интенсивность второстепенного направления, авт./ч | Практическая пропускная способность потока легковых автомобилей по направлению, авт./ч | | |
|---|--|----------|--------|
| | 0,106429 | 0,113448 | 0,1145 |
| 300 | – | 0,14 | – |
| 400 | 0,121 | 0,473 | – |
| 500 | 0,523 | 0,649 | 0,667 |
| 600 | 0,68 | 0,814 | 0,88 |
| 700 | 1,124 | 1,153 | 1,17 |
| 800 | 1,009 | 1,457 | 1,338 |
| 900 | 1,594 | 1,877 | 1,561 |
| 1000 | 1,895 | 1,977 | 1,951 |
| 1100 | 2,168 | 2,166 | 2,179 |
| 1200 | 2,426 | 2,612 | 2,421 |
| 1300 | 2,645 | – | – |
| 1400 | 3,068 | – | – |

Проведенный подбор регрессионных зависимостей позволил рекомендовать следующие зависимости для определения скорости нарастания очереди, представленные в таблице 4.19.

Таблица 4.19 – Зависимости для определения скорости нарастания очереди

| Направление | Зависимость | Коэффициент детерминации |
|---|---|--------------------------|
| Левоповоротный съезд | $k = 0,903N_{\text{гл}}' - 0,39N_{\text{вт}} - 1,632$ | 0,897 |
| Правосторонний съезд | $k = 0,909N_{\text{гл}}' - 0,855N_{\text{вт}} - 2,48$ | 0,919 |
| Нерегулируемое пересечение направление прямо-налево | $k = 0,879N_{\text{гл}} - 0,729N_{\text{вт}} - 0,9$ | 0,801 |
| Регулируемое пересечение направление прямо-налево | $k = 0,2P_{\text{пл}} + 1,008N_{\text{вт}} - 5,242$ | 0,982 |
| Регулируемое пересечение правый поворот | $k = 0,077P_{\text{п}} + 1,002N_{\text{вт}} - 2,648$ | 0,984 |

Из таблицы 4.19 видно, что линейная зависимость хорошо описывает все возможные случаи, т.к. значение коэффициента детерминации для всех зависимостей больше 0,8.

Решение уравнений пределов пропускной способности представлено в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Определение пределов пропускной способности по результатам имитационных экспериментов

| № опыта | Нерегулируемое пересечение, правый поворот | Левоповоротный съезд | Нерегулируемое пересечение, направление прямо-налево | Регулируемое пересечение, направление прямо-налево | Регулируемый, правый поворот |
|---------|--|----------------------|--|--|------------------------------|
| 1 | 1026 | 1195 | 901 | 556 | 363 |
| 2 | 948 | 838 | 719 | 423 | 244 |
| 3 | 919 | 809 | 589 | 465 | 327 |
| 4 | 890 | 1029 | 586 | – | – |

Окончание таблицы 4.20

| № опыта | Нерегулируемое пересечение, правый поворот | Левоповоротный съезд | Нерегулируемое пересечение, направление прямо-налево | Регулируемое пересечение, направление прямо-налево | Регулируемый, правый поворот |
|---------|--|----------------------|--|--|------------------------------|
| 5 | 767 | 788 | 549 | – | – |
| 6 | 733 | 763 | 470 | – | – |
| 7 | 814 | 624 | 450 | – | – |
| 8 | 834 | 573 | 399 | – | – |
| 9 | 695 | 462 | | – | – |
| 10 | 732 | 645 | 481 | – | – |
| Среднее | 872 | 773 | 570 | 481 | 311 |

Таким образом, нерегулируемые направления имеют преимущества перед простой двухфазной схемой регулирования – предел пропускной способности правого поворота у нерегулируемого пересечения в 1,81 раза больше, чем у регулируемого.

4.5 Исследование убывания очереди

Для совершенствования методов вычисления средней задержки в очереди проводилось исследование скорости убывания очереди для случаев, когда интенсивность движения падает ниже предела пропускной способности. С этой целью имитировалась работа очереди при заданной интенсивности движения при начальном количестве около 100 ожидающих автомобилей. Пример полученных результатов приведен на рисунке 4.5.

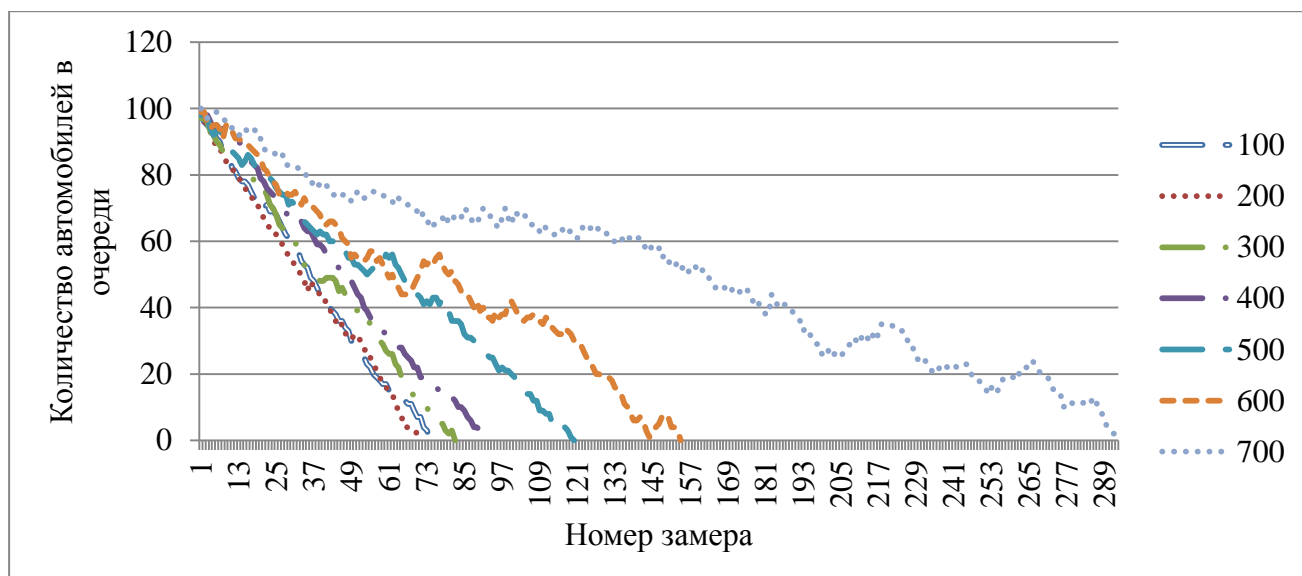


Рисунок 4.5 – Диаграмма убывания очереди при падении интенсивности движения ниже предела пропускной способности на нерегулируемом пересечении при интенсивности движения на главной дороге 200 авт./ч

Полученные экспериментальные данные с высокой степенью точности описываются линейными зависимостями, приведенными в таблицах 4.21–4.24.

Таблица 4.21 – Зависимости убывания очереди для нерегулируемого пересечения направления прямо-налево

| Интенсивность движения второго-степенного направления, авт./ч | Интенсивность движения на главной дороге, авт./ч | | |
|---|--|-----------------------|-----------------------|
| | 200 | 400 | 600 |
| 100 | $y = -1,339x + 98,28$ | $y = -1,588x + 101,5$ | $y = -1,463x + 97,17$ |
| | $R^2 = 0,995$ | $R^2 = 0,998$ | $R^2 = 0,995$ |
| 200 | $y = -1,353x + 96,61$ | $y = -1,581x + 100,0$ | $y = -1,462x + 96,9$ |
| | $R^2 = 0,996$ | $R^2 = 0,988$ | $R^2 = 0,996$ |
| 300 | $y = -1,208x + 98,59$ | $y = -1,458x + 101,9$ | $y = -1,663x + 101,3$ |
| | $R^2 = 0,994$ | $R^2 = 0,995$ | $R^2 = 0,988$ |
| 400 | $y = -1,112x + 101,3$ | $y = -1,581x + 100,0$ | $y = -1,597x + 98,67$ |
| | $R^2 = 0,996$ | $R^2 = 0,988$ | $R^2 = 0,992$ |
| 500 | $y = -0,771x + 96,19$ | $y = -1,362x + 94,77$ | $y = -1,616x + 102,8$ |
| | $R^2 = 0,987$ | $R^2 = 0,987$ | $R^2 = 0,994$ |

Окончание таблицы 4.21

| Интенсивность движения второстепенного направления, авт./ч | Интенсивность движения на главной дороге, авт./ч | | |
|--|--|-----------------------|-----------------------|
| | 200 | 400 | 600 |
| 600 | $y = -0,579x + 93,11$ | $y = -0,999x + 106,7$ | $y = -1,746x + 96,99$ |
| | $R^2 = 0,963$ | $R^2 = 0,980$ | $R^2 = 0,991$ |
| 700 | $y = -0,292x + 94,03$ | $y = -1,102x + 99,76$ | $y = -1,746x + 96,99$ |
| | $R^2 = 0,971$ | $R^2 = 0,991$ | $R^2 = 0,991$ |
| 800 | – | $y = -0,601x + 98,16$ | $y = -1,324x + 98,16$ |
| | – | $R^2 = 0,981$ | $R^2 = 0,993$ |
| 900 | – | – | $y = -1,710x + 112,7$ |
| | – | – | $R^2 = 0,973$ |

Таблица 4.22 – Зависимости убывания очереди при падении интенсивности движения ниже предела пропускной способности для нерегулируемого пересечения на правом повороте

| Интенсивность движения по второстепенному направлению авт./ч | Интенсивность движения по крайней полосе главной дороги авт./ч | | |
|--|--|-----------------------|-----------------------|
| | 100 | 300 | 600 |
| 100 | $y = -1,247x + 94,98$ | $y = -1,230x + 98,36$ | $y = -0,280x + 99,14$ |
| | $R^2 = 0,985$ | $R^2 = 0,992$ | $R^2 = 0,923$ |
| 400 | $y = -1,031x + 108,1$ | $y = -1,185x + 98,42$ | $y = -0,629x + 97,48$ |
| | $R^2 = 0,986$ | $R^2 = 0,992$ | $R^2 = 0,973$ |
| 700 | $y = -0,784x + 106,5$ | $y = -0,531x + 94,65$ | $y = -0,206x + 87,94$ |
| | $R^2 = 0,971$ | $R^2 = 0,982$ | $R^2 = 0,940$ |

Таблица 4.23 – Зависимости убывания очереди для регулируемого пересечения по направлению прямо-налево

| Интенсивность движения второстепенного направления, авт./ч | Параметры цикла светофора (зеленый-красный), с | | |
|--|--|-----------------------|-----------------------|
| | 45–90 | 30–60 | 20–40 |
| 100 | $y = -0,855x + 62,57$ | $y = -0,969x + 98,33$ | $y = -1,236x + 102,5$ |
| | $R^2 = 0,970$ | $R^2 = 0,991$ | $R^2 = 0,996$ |

Окончание таблицы 4.23

| | | | |
|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 200 | $y = -0,712x + 99,26$ | $y = -0,854x + 102,5$ | $y = -0,946x + 101,8$ |
| | $R^2 = 0,988$ | $R^2 = 0,993$ | $R^2 = 0,993$ |
| 300 | $y = -0,303x + 71,10$ | $y = -0,479x + 84,83$ | $y = -0,516x + 98,86$ |
| | $R^2 = 0,942$ | $R^2 = 0,965$ | $R^2 = 0,981$ |
| 400 | – | $y = -0,154x + 92,24$ | $y = -0,425x + 100,2$ |
| | – | $R^2 = 0,927$ | $R^2 = 0,975$ |

Таблица 4.24 – Зависимости для убывания очереди для правого поворота регулируемого пересечения

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Параметры цикла светофора (зеленый-красный), с | | |
|--|--|-----------------------|-----------------------|
| | 45–90 | 30–60 | 20–40 |
| 100 | $y = -0,362x + 103,4$ | $y = -0,563x + 99,57$ | $y = -0,538x + 99,13$ |
| | $R^2 = 0,986$ | $R^2 = 0,987$ | $R^2 = 0,975$ |
| 200 | $y = -0,152x + 100,0$ | $y = -0,277x + 95,51$ | $y = -0,389x + 98,28$ |
| | $R^2 = 0,928$ | $R^2 = 0,963$ | $R^2 = 0,987$ |

Аналогично нарастанию очереди, коэффициент перед x есть скорость убывания. Для его определения рекомендуем зависимости, представленные в таблице 4.25.

Таблица 4.25 – Зависимости скорости убывания очереди от интенсивности пересекающихся потоков

| Направление | Зависимость | Коэффициент детерминации |
|---|---|--------------------------|
| Левоповоротный съезд | $K = 0,006N_{gl} + 0,001N_{vr} - 2,522$ | 0,839 |
| Правосторонний съезд | $K = -0,043N_{gl} - 0,039N_{vr} + 37,16$ | 0,209 |
| Нерегулируемое пересечение направление прямо-налево | $K = -0,001N_{gl} + 0,000805N_{vr} - 0,987$ | 0,3422 |
| Регулируемое пересечение направление прямо-налево | $K = 22,34P + 0,003N_{vr} - 4,52$ | 0,92 |
| Регулируемое пересечение правый поворот | $K = 17,82P + 0,002N_{vr} - 3,24$ | 0,959 |

4.6 Предложения по совершенствованию методов определения задержки транспорта

Модернизация метода определения средней задержки транспорта на пересечении основывается на формуле (1.16) и включает в себя полученные результаты исследования. Числитель формулы (1.16), по сути, есть не что иное, как оценка площади криволинейной трапеции, где $f(x)$, есть функция количества автомобилей в очереди в зависимости от времени. Причем для случаев, когда загрузка движением больше единицы, данная площадь является треугольником. Тогда на рассматриваемый период, в течение которого интенсивность превышает пропускную способность, строим прямую интенсивности I и в конце периода наблюдения отнимаем значение практической пропускной способности, что позволяет нам получить искомый треугольник изменения длины очереди (рисунок 4.6).

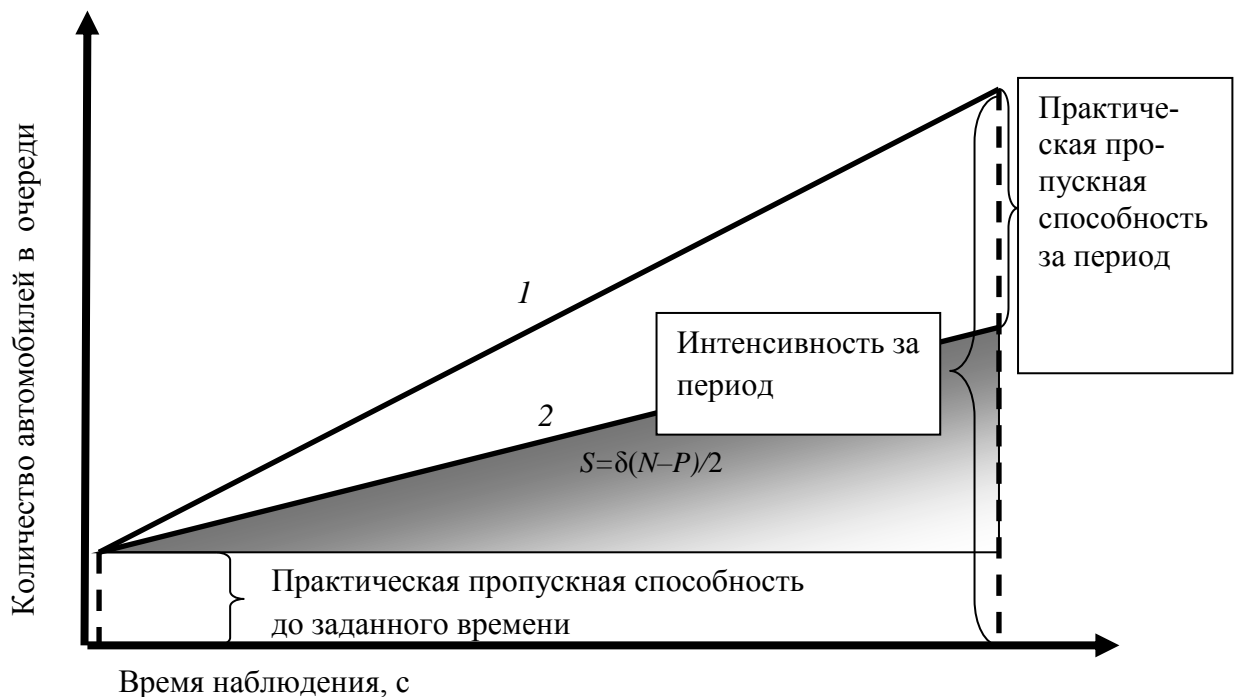


Рисунок 4.6 – Графическое определение средней задержки при коэффициенте загрузки движением больше единицы

Таким образом, площадь закрашенной фигуры составит

$$S = \frac{\delta(N - P)}{2}, \quad (4.1)$$

где δ – время наблюдения, с; N – интенсивность движения за время наблюдения; P – практическая пропускная способность за время наблюдения.

Тогда формула (1.16) преобразуется к виду

$$t_w = \frac{\delta(N - P)}{2N}. \quad (4.2)$$

Из полученных результатов исследования используется линейная зависимость с углом наклона, получаемым по зависимостям в таблице 4.19 для случаев превышения интенсивности движения над пределом пропускной способности, и таблицы 4.25 в том случае, если, наоборот, происходит падение интенсивности движения ниже предела пропускной способности (рисунки 4.7, 4.8).

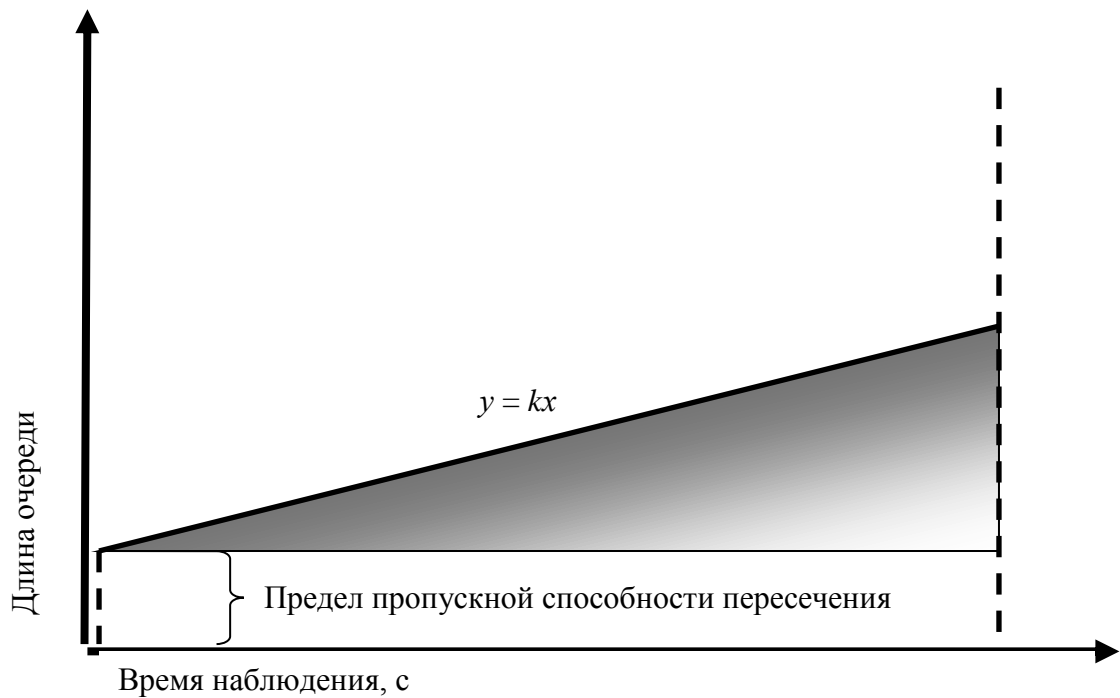


Рисунок 4.7 – Использование результатов наблюдения для определения средней задержки транспорта в случае превышения интенсивности движения предела пропускной способности

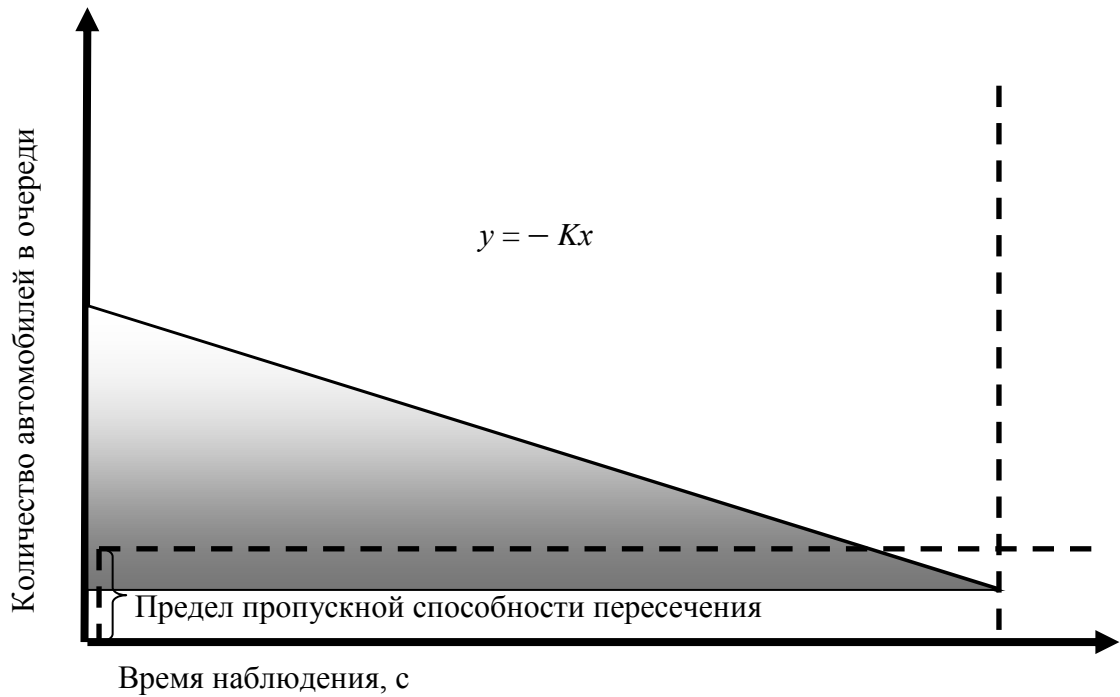


Рисунок 4.8 – Использование результатов исследования для определения средней задержки транспорта в случае снижения интенсивности движения ниже предела пропускной способности пересечения

Таким образом, результаты исследования позволяют определять величину средней задержки транспорта при любой интенсивности движения и в наилучшем варианте согласно диаграммам изменения интенсивности движения в течение суток на пересекающихся дорогах (таблица 5.1).

Таблица 4.26 – Зависимости для определения длины очереди

| Направление | Зависимость | Коэффициент детерминации |
|---|--|--------------------------|
| Левоповоротный съезд | $N_{оч} = -0,0048N'_{gl} + 0,015N_{vr} - 1,419$ | 0,448 |
| Правосторонний съезд | $N_{оч} = -0,0347N'_{gl} + 0,0542N_{vr} - 12,13$ | 0,425 |
| Нерегулируемое пересечение направление прямо-налево | $N_{оч} = -0,047N_{gl} + 0,08N_{vr} + 12,13$ | 0,402 |
| Регулируемое пересечение направление прямо-налево | $N_{оч} = 0,0264N_{gl} + 471,04P - 70,33$ | 0,518 |
| Регулируемое пересечение правый поворот | $N_{оч} = 0,082N_{gl} + 1266,96P + 1266,96$ | 0,527 |

4.7 Оценка точности метода определения задержки транспорта

Оценка точности метода выполнена путем определения средней абсолютной ошибки по формуле:

$$\Delta_{\text{абс}} = \frac{|t_{\text{вп}} - t_{\text{вф}}|}{t_{\text{вф}}} \cdot 100\%. \quad (4.3)$$

Для сравнения результатов возьмем данные для направления прямо и налево, полученные в ходе имитационного моделирования (таблицы 4.27, 4.28).

Таблица 4.27 – Задержка транспорта в очереди по направлению движения прямо-налево на нерегулируемом пересечении

| Интенсивность второстепенного направления | Интенсивность главной дороги, авт./ч | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|-------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 2000 |
| 200 | 10,02 | 13,06 | 17,23 | 33,46 | 28,02 | 84,69 | 25,43 | 55,94 | 38,41 |
| 400 | – | 9,88 | 60,44 | 25,53 | 39,41 | 85,44 | 222,79 | 785,17 | 531,44 |
| 600 | – | – | 93,97 | 419,14 | 502,91 | 407,74 | 852,02 | 786,31 | 1109,04 |
| 800 | – | – | – | 784,33 | 721,14 | 984,80 | 1091,06 | 989,21 | 1248,47 |
| 1000 | – | – | – | – | 948,62 | 1083,28 | 1127,67 | 1108,01 | 1458,22 |
| 1200 | – | – | – | – | – | 1167,86 | 1100,97 | 1219,37 | 1410,32 |
| 1400 | – | – | – | – | – | – | 1272,01 | 1559,22 | 1653,16 |
| 1600 | – | – | – | – | – | – | – | 1613,67 | 1610,34 |
| 2000 | – | – | – | – | – | – | – | – | 1541,94 |

Таблица 4.28 – Практическая пропускная способность по направлению движения прямо-налево на нерегулируемом пересечении

| Интенсивность второстепенного направления | Интенсивность главной дороги, авт./ч | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 2000 |
| 200 | 198 | 201 | 199 | 216 | 202 | 210 | 192 | 190 | 177 |
| 400 | – | 409 | 465 | 393 | 377 | 388 | 409 | 229 | 293 |

Окончание таблицы 4.28

| Интенсивность второстепенного направления | Интенсивность главной дороги, авт./ч | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 2000 |
| 600 | – | – | 555 | 510 | 482 | 402 | 287 | 309 | 280 |
| 800 | – | – | – | 474 | 478 | 346 | 354 | 362 | 242 |
| 1000 | – | – | – | – | 419 | 379 | 421 | 323 | 267 |
| 1200 | – | – | – | – | – | 434 | 352 | 266 | 246 |
| 1400 | – | – | – | – | – | – | 365 | 238 | 252 |
| 1600 | – | – | – | – | – | – | – | 251 | 243 |
| 2000 | – | – | – | – | – | – | – | – | 287 |

Оценка точности экспериментального метода на основе формулы (1.16) дает следующий результат, представленный в таблице 4.29.

Таблица 2.29 – Результаты применения экспериментального метода для направления прямо – налево нерегулируемого пересечения

| Интенсивность второстепенно- го направления авт./ч | Интенсивность главной дороги, авт./ч | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 2000 |
| 200 | 10,00 | 12,67 | 43,39 | 33,24 | 29,59 | 83,61 | 25,91 | 65,53 | 46,40 |
| 400 | – | 10,13 | 59,37 | 24,80 | 39,63 | 92,21 | 227,75 | 1245,33 | 786,79 |
| 600 | – | – | 255,34 | 509,75 | 644,61 | 667,25 | 1780,21 | 1529,19 | 2267,41 |
| 800 | – | – | – | 1302,88 | 1367,63 | 2258,50 | 2364,05 | 2303,92 | 4481,91 |
| 1000 | – | – | – | – | 2230,44 | 3000,31 | 2560,68 | 3918,64 | 5517,95 |
| 1200 | – | – | – | – | – | 3480,50 | 3986,02 | 6260,60 | 6978,73 |
| 1400 | – | – | – | – | – | – | 4928,90 | 9423,87 | 7884,92 |
| 1600 | – | – | – | – | – | – | – | 9816,41 | 9993,31 |
| 2000 | – | – | – | – | – | – | – | – | 10833,75 |

Оценка средней абсолютной ошибки представлена в таблице 4.30.

Таблица 4.30 – Значения абсолютной ошибки для экспериментального метода, %

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Интенсивность главной дороги, авт./ч | | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 2000 |
| 200 | 0 | 3 | 152 | 1 | 6 | 1 | 2 | 17 | 21 |
| 400 | – | 3 | 2 | 3 | 1 | 8 | 2 | 59 | 48 |
| 600 | – | – | 172 | 22 | 28 | 64 | 109 | 94 | 104 |
| 800 | – | – | – | 66 | 90 | 129 | 117 | 133 | 259 |
| 1000 | – | – | – | – | 135 | 177 | 127 | 254 | 278 |
| 1200 | – | – | – | – | – | 198 | 262 | 413 | 395 |
| 1400 | – | – | – | – | – | – | 287 | 504 | 377 |
| 1600 | – | – | – | – | – | – | – | 508 | 521 |
| 1800 | – | – | – | – | – | – | – | – | 603 |

По данным таблицы 4.30 видно, что экспериментальный метод эффективен для значений коэффициента загрузки движением меньше единицы, средняя абсолютная ошибка для этого случая составит 19 %. В случае более высоких значений коэффициента загрузки движением средняя абсолютная ошибка накапливается существенно и составляет 230 %.

Оценка точности модернизированного варианта метода при значениях коэффициента загрузки движением больше единицы представлена в таблице 4.31.

Таблица 4.31 – Значения абсолютной ошибки для модернизированного метода, %

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Интенсивность главной дороги, авт./ч | | | | | | |
|--|--------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|
| | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 2000 |
| 600 | 10 | 1 | 5 | 1 | 6 | 9 | 14 |
| 800 | – | 2 | 2 | 6 | 2 | 9 | 15 |
| 1000 | – | – | 14 | 7 | 13 | 21 | 20 |
| 1200 | – | – | – | 11 | 17 | 22 | 31 |
| 1400 | – | – | – | – | 23 | 29 | 27 |

Окончание таблицы 4.31

| Интенсивность второстепенного направления авт./ч | Интенсивность главной дороги, авт./ч | | | | | | |
|--|--------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|
| | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 2000 |
| 1600 | – | – | – | – | – | 31 | 41 |
| 1800 | – | – | – | – | – | – | 42 |

Средняя абсолютная ошибка для модернизированного метода составит 15 %, что лучше экспериментального и доказывает эффективность предлагаемого решения.

Выводы к главе 4

1. Дано определение предела пропускной способности пересечения и установлены его значения для направлений типовых пересечений автомобильных дорог с учетом допускаемого водителями риска ДТП. Установлено, что для нерегулируемого левоповоротного съезда предел пропускной способности в среднем равен 773 прив. авт./ч, для правого поворота – 872 прив. авт./ч, для направления прямо-налево – 570 прив. авт./ч. Для регулируемого пересечения предел пропускной способности для простой двухфазовой схемы регулирования составил: для направления прямо – налево – 481 прив. авт./ч, правый поворот – 311 прив. авт./ч. Выявлены зависимости длины очереди и задержки транспорта для случаев загрузки движением меньше и больше единицы.

2. Установлено, что длина очереди при загрузке движением больше единицы описывается линейной зависимостью и главное воздействие здесь оказывает скорость нарастания очереди.

3. Установлены зависимости длины очереди от интенсивности пересекающихся потоков для случаев падения интенсивности движения ниже предела пропускной способности.

4. Обоснован метод расчета средней задержки транспорта при значении коэффициента загрузки больше единицы. Для нерегулируемых пересечений, в слу-

чае загрузки движением больше единицы, средняя абсолютная ошибка составляет 16 %, что позволяет снизить ошибку экспериментальных методов в два раза.

5. Установлены зависимости для определения средней задержки транспорта в зависимости от интенсивности пересекающихся потоков.

5 ПОСТРОЕНИЕ МАТРИЦЫ ВЫБОРА ТИПА ПЕРЕСЕЧЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

5.1 Построение номограммы областей эффективного применения основных типов пересечений

На основе значений среднего предела пропускной способности для направлений построим область эффективного применения основных типов транспортных развязок (рисунок 5.1).

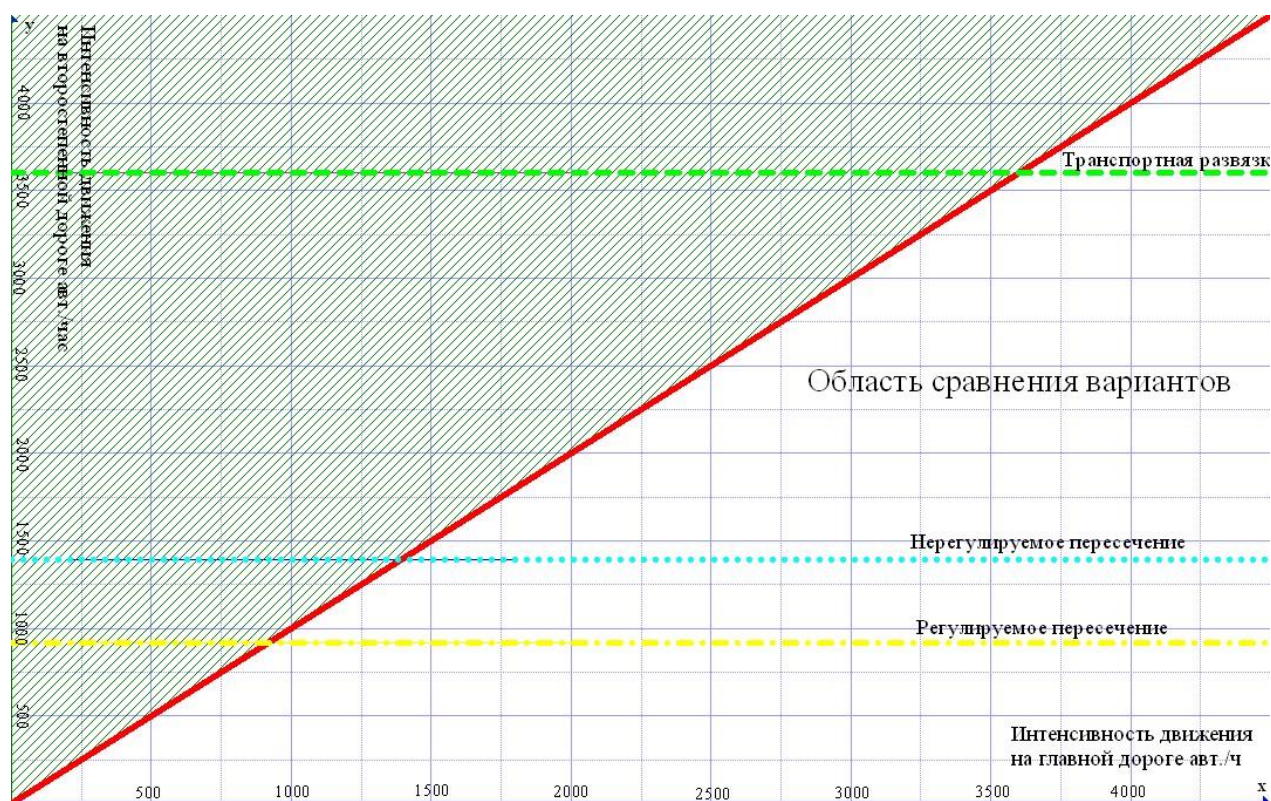


Рисунок 5.1 – Области эффективного применения основных типов пересечений для среднего значения предела пропускной способности

Превышение области применения нерегулируемого пересечения над регулируемым, обусловлено уровнем риска, допускаемым водителем. При более низком уровне риска, значение граничного интервала времени принимает большее значение, что снижает пропускную способность. Заштрихованная область представляет собой область невозможного события, т.е. интенсивность движения на

второстепенном направлении не может превышать интенсивности главной дороги.

По итогам анализа результатов имитационных экспериментов были построены зависимости значений пределов пропускной способности от интенсивности движения на главной дороге (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Зависимости значения предела пропускной способности от интенсивности движения на главной дороге

| Тип пересечения | Зависимость предела пропускной способности от интенсивности движения на главной дороге |
|----------------------------|--|
| Нерегулируемое пересечение | $y = 6349,82x^{-0,224}$ |
| | $R^2 = 0,81$ |
| Регулируемое пересечение | Максимальный средний предел пропускной способности |
| Транспортная развязка | $y = 8134,76x^{-0,131}$ |
| | $R^2 = 0,89$ |

На основании зависимостей, представленных в таблице 5.1, построена номограмма эффективного использования основных типов пересечений (рисунок 5.2).

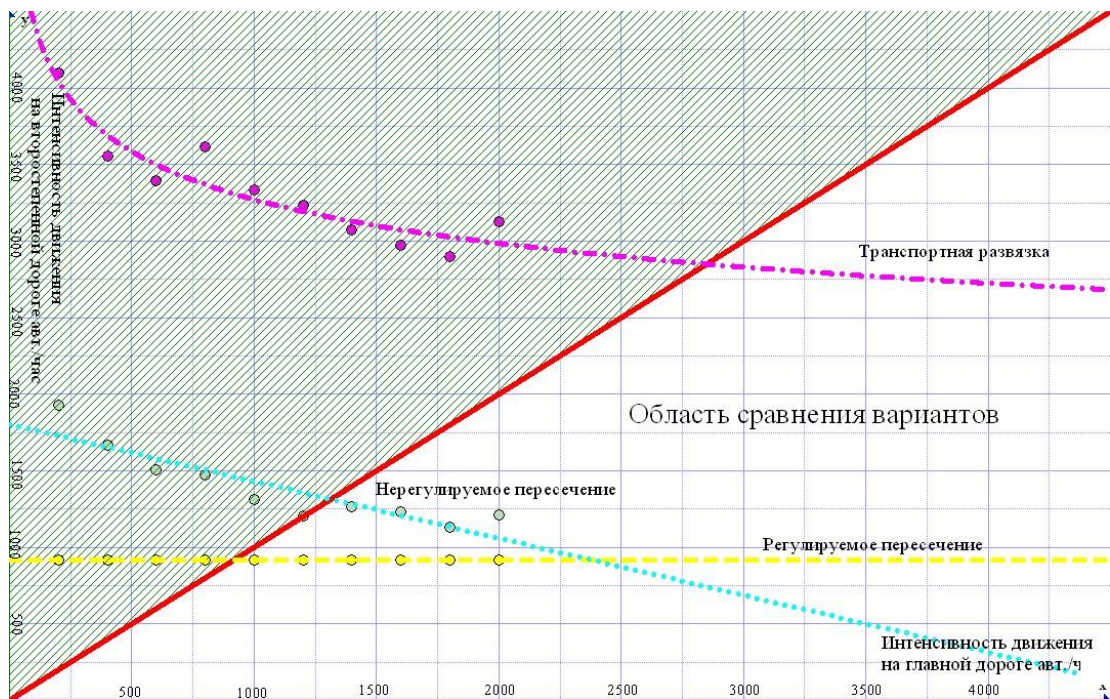


Рисунок 5.2 – Номограмма областей эффективного применения основных типов пересечений

В отличие от средних значений, зависимость предела пропускной способности от интенсивности движения на главной дороге позволяет оценить изменение области эффективного применения от интенсивности пересекающихся потоков. В частности, с ростом интенсивности движения на главной дороге сокращается область применения нерегулируемого пересечения.

5.2 Формирование итоговой матрицы выбора типа пересечения автомобильных дорог

Матрица выбора типа пересечения формировалась из следующих условий:

пересечение является типовым;

интенсивности движения ТС на всех полосах главной дороги равны друг другу;

интенсивности на всех полосах второстепенной дороги равны друг другу;

интенсивность левого поворота второстепенной дороги составляет 15 % от общей интенсивности движения второстепенной дороги;

исключены условно невозможные варианты, когда интенсивность второстепенной дороги превышает интенсивность главной дороги;

критерий сравнения вариантов движения – средневзвешенная величина транспортной задержки, приходящейся на один автомобиль.

Пример сформированной матрицы выбора типа пересечения приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнение вариантов пересечения по критерию задержки транспорта

| Интенсивность движения на второстепенной дороге, авт./ч | Нерегулируемое пересечение | | Транспортная развязка | | Параметры цикла светофора (зеленый-красный), с | | |
|---|--|-------|-----------------------|------|--|--------|-------|
| | интенсивность движения на главной дороге, авт./ч | | | | | | |
| | 500 | 1000 | 500 | 1000 | 20–40 | 45–90 | 30–60 |
| 200 | 8,33 | 7,38 | 6,58 | 8,29 | 12,36 | 34,46 | 25,61 |
| 300 | 10,90 | 12,47 | 7,69 | 9,39 | 19,717 | 150,96 | 37,38 |

| Интенсивность движения на второстепенной дороге, авт./ч | Нерегулируемое пересечение | | Транспортная развязка | | Параметры цикла светофора (зеленый-красный), с | | |
|---|--|--------|-----------------------|-------|--|--------|--------|
| | интенсивность движения на главной дороге, авт./ч | | | | | | |
| | 500 | 1000 | 500 | 1000 | 20–40 | 45–90 | 30–60 |
| 600 | – | 38,74 | – | 9,45 | 27,07 | 267,46 | 49,14 |
| 900 | – | 108,72 | – | 10,62 | 188,8105 | 473,61 | 294,49 |
| 1000 | – | 193,40 | – | 12,95 | 401,55 | 679,77 | 539,84 |

Из таблицы 5.1 видно, что сфера применения регулируемых пересечений ограничена и по всем показателям значительно уступает нерегулируемым пересечениям. Кроме того, в случае загрузки движением больше единицы по критерию задержки транспорта в очереди наиболее эффективной является транспортная развязка.

Выводы к главе 5

1. Установлено, что при превышении загрузкой движения пределов пропускной способности, наименьшую среднюю задержку транспорта в очереди имеет вариант транспортной развязки. Так, для интенсивности второстепенного направления 1000 прив. авт./ч в случае использования транспортной развязки задержка транспорта снизится с 193,4 с до 12,95 с, т.е. примерно в 15 раз.

2. Установлены области эффективного применения основных типов пересечений для уровня риска допускаемого водителями в Свердловской области на основе среднего предела пропускной способности.

3. Определены области эффективного применения основных типов пересечений по зависимости предела пропускной способности от интенсивности движения на пересекающихся дорогах.

4. Определено, что с ростом интенсивности движения нерегулируемые пересечения становятся менее эффективными по сравнению с регулируемым. В частности, начиная с интенсивности главной дороги 2350 авт./ч рекомендуется

применять регулируемые пересечения. Так же регулируемые пересечения используются в случаях, регламентированных ГОСТ Р 52289–2004 «Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты и выводы:

1. Научно обоснованы критерии оценки эффективности функционирования узлов УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования в условиях высокого уровня их загрузки. Этими критериями выбраны: величина средней и суммарной задержки транспорта на пересечении; длина очереди на подходе к пересечению, характеризующая вероятность сетевого затора.

2. Обоснована стохастическая дискретно-событийная модель, позволяющая оценивать задержки транспорта и длину очереди на основных типах пересечений, и уточнены значения параметров, входящих в эти модель. Определены параметры наполнения модели для регулируемых пересечений. Установлено, что риск ДТП, допускаемый водителями в Свердловской области, составляет в среднем $r = 0,001183$, средняя величина интервала между автомобилями в заторе – 2,9 м. Произведено имитационное моделирование движения транспортных потоков на пересечениях. Сформулировано определение предела пропускной способности пересечения и установлены его значения для направлений основных пересечений с учетом допускаемого водителями риска ДТП.

3. Определены области применения основных типов пересечений. Установлено, что для нерегулируемого левоповоротного съезда предел пропускной способности в среднем равен 773 прив. авт./ч, для правого поворота – 872, для направления прямо-налево – 570. Для регулируемого пересечения предел пропускной способности для простой двухфазовой схемы регулирования составил: для направления прямо – налево – 481, правый поворот – 311. Выявлено, что для случаев превышения пропускной способности количество автомобилей в очереди имеет линейный рост. Установлена зависимость между интенсивностью пересекающихся потоков и скоростью нарастания очереди для нерегулируемых пересечений. Определена зависимость от интенсивности движения и практической про-

пускной способности для количества автомобилей в очереди на регулируемом пересечении.

4. Предложены рекомендации по совершенствованию организации движения на основе уточнения выбора типа пересечения. Установлены области эффективного применения основных типов пересечений для уровня риска, допускаемого водителями в Свердловской области, на основе среднего предела пропускной способности. Определены области эффективного применения основных типов пересечений по зависимости предела пропускной способности от интенсивности движения на пересекающихся дорогах. Определено, что с ростом интенсивности движения нерегулируемые пересечения становятся менее эффективными по сравнению с регулируемым. В частности, начиная с интенсивности главной дороги 2350 авт./ч рекомендуется применять регулируемые пересечения. Также регулируемые пересечения используются в случаях, регламентированных ГОСТ Р 52289–2004 «Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов, В.А. Экономическая эффективность рациональной организации движения / В.А. Аксенов, Е.П. Попова, О.А. Дивочкин. – М. : Транспорт, 1987. – 128 с.
2. Андронов, Р.В. Моделирование очередей на регулируемых пересечениях улично-дорожной сети крупного города в условиях плотных транспортных потоков: дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Тюмень, 2007. – 184 с.
3. Ашмарин, И.П. Быстрые методы статистической обработки и планирование эксперимента / И.П. Ашмарин, Н.И. Васильев, В.А. Амбросов. – Л. : Ленинградский государственный университет, 1971. – 78 с.
4. Бабков, В.Ф. Дорожные условия и организация движения / В.Ф. Бабков, О.А. Дивочкин, В.П. Залуга. – М. : Транспорт, 1974. – 174 с.
5. Бабков, В.Ф. Дорожные условия и режимы движения автомобилей / В.Ф. Бабков, М.Б. Афанасьев, А.П. Васильев. – М. : «Транспорт», 1967. – 205 с.
6. Бакутис, В.Э. Городские улицы, дороги и транспорт / В.Э. Бакутис, Е.В. Овечников. – М. : Высшая школа, 1971. – 264 с.
7. Боцманов, В.Г. Исследование закономерностей насыщенных транспортных потоков для решения некоторых задач организации движения : автореф. дис.... на соиск. ученой степени канд. техн. наук: 18.00.04 / Боцманов В.Г. – М., 1969. – 38 с.
8. Боярский, С.Н. Исследование параметров конфликтных зон на пересечениях автомобильных дорог в зависимости от скоростей пересекающихся транспортных потоков/ С.Н. Боярский, Р.Н. Ковалев, О.В. Минин // Транспорт Урала. – 2005. – № 2. – С. 21-24.
9. Боярский, С.Н. Моделирование задержки транспорта на пересечениях автомобильных дорог и транспортных развязках / С.Н. Боярский // Сб. науч. тр. ученых и специалистов факультета экономики и управления. Вып.3 / Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2012. – С. 14-22.

10. Боярский, С.Н. Моделирование параметров зоны влияния на пересечениях автомобильных дорог в одном уровне / С.Н. Боярский, Р.Н. Ковалев // Транспорт Урала. – 2006. – № 1. – С. 76-78.

11. Боярский, С.Н. Обоснование выбора теоретической модели транспортного потока на регулируемом пересечении автомобильных дорог / С.Н. Боярский // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура: материалы научно-технической конференции, посвященной 55-летию УрГУПС: в 2 т. // Уральский государственный университет путей сообщения – Екатеринбург, 2011. – Вып. 97(180), т. 2. – С. 529-535.

12. Боярский, С.Н. Результаты имитационного моделирования задержки транспорта на пересечениях автомобильных дорог / С.Н. Боярский, Р.Н. Ковалев // Автотранспортное предприятие. – 2014. – № 2. – С. 53-55.

13. Боярский, С.Н. Результаты имитационного моделирования задержки транспорта на нерегулируемых пересечениях автомобильных дорог / С.Н. Боярский // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика / Пермский национальный исследовательский университет – Пермь, 2014 – т.2. – С.82-91.

14. Боярский, С.Н. Совершенствование методов определения средней задержки транспорта на пересечении автомобильных дорог с высоким значением коэффициента загрузки движением // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3; URL: <http://www.science-education.ru/117-13368>.

15. Боярский, С.Н. Теоретическое обоснование общей модели определения задержки транспорта на пересечениях автомобильных дорог / С.Н. Боярский, Р.Н. Ковалев // Транспорт Урала. – 2012. – № 2. – С. 64-69.

16. Буслаев, А. П. Вероятностные имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения / А. П. Буслаев, В.М. Приходько. – М. : Мир, 2003. – 367 с.

17. Бусленко, Н.П. Метод статистических испытаний / Н.П. Бусленко, Ю.А. Шрейдер. – М. : Физматгиз, 1961. – 226 с.

18. Бутягин, В.А. Планировка и благоустройство городов / В.А. Бутягин. – М. : Стройиздат, 1974.– 381 с.

19. Васильев, А.П. Эксплуатация автомобильных дороги и организация дорожного движения: Учебник для вузов / А.П. Васильев, В.М. Сиденко. – М. : Транспорт, 1990.– 304 с.
20. Васильева, А.П. Ремонт и содержание автомобильных дорог. Справочник инженера-дорожника / под ред. проф. А.П. Васильева – М. : Транспорт, 1989. – 287 с.
21. Васильева, Е. М. Оптимизация планирования и управления транспортными системами / Е.М. Васильева, Б. Ю. Левит, Р. В. Игудин В.Н. Лившиц. – М. : Транспорт, 1987. – 208 с.
22. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 178 с.
23. Вероятностные и имитационные подходы / А.П. Буслаев, А.В. Новиков, В.М. Приходько и др. – М. : Мир, 2003. – 368 с.
24. Владимиров, В.А. Инженерные основы дорожного движения / В.А. Владимиров.– М. : Стройиздат, 1975. – 412 с.
25. Вол, М. Анализ транспортных систем / пер. с англ. / М. Вол, Б. Мартин. – М. : Транспорт, 1989. – 514 с.
26. Габарда, Д. Новые транспортные системы в городском общественном транспорте / пер. со словацк. / Д. Габарда. – М. : Транспорт, 1990. – 216 с.
27. Глухарева, Т.А. Организация движения грузовых автомобилей в городах/ Т.А. Глухарева, Р.В. Горбанев. – М. : Транспорт, 1989. – 125 с.
28. ГОСТ Р 52398–2005. Классификация автомобильных дорог. – М. : Стандартиформ, 2006. – 4 с.
29. Гохман, В.А. Пересечения и примыкания автомобильных дорог : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / В.А. Гохман, В.М. Визгалов, М.П. Поляков / М. : Высшая школа, 1989. – 319 с.
30. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке (методы обработки данных) / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – 511 с.
31. Дружинин, Н.К. Выборочное наблюдение и эксперимент / Н.К. Дружинин. – М. : Статистика, 1977. – 176 с.

32. Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Дрю. – М. : Транспорт, 1972. – 424 с.
33. Дубровин, Е.Н. Пересечения в разных уровнях на городских магистралях / Е.Н. Дубровин, Ю.С. Ланцберг, И.М. Лялин и др. – М. : Высшая школа, 1977. – 430 с.
34. Зотов, Д.К. Проблемы развития транспорта СССР / Д.К. Зотов, С.С. Ушаков. – М. : Транспорт, 1990. – 304 с.
35. Иносэ, Х. Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамада. – М. : Транспорт, 1983. – 248 с.
36. Калашников, В.В. Моделирование и анализ систем на базе агрегативного подхода Н.П.Бусленко. В кн.: «Философско-методологические основания системных исследований» / В.В. Калашников. – М. : Наука, 1983. С. 240– 248.
37. Калинин, В.Н. Математическая статистика / В.Н. Калинин, В.Ф. Панин. – М. : Высшая школа, 1994. – 335 с.
38. Капитанов, В.Т. Управление транспортными потоками в городах / В.Т. Капитанов, Е.Б. Хилажев. – М. : Транспорт, 1985. – 94 с.
39. Карась, Ю. В. Транспортные потоки и безопасность движения на автомобильных дорогах / Ю. В. Карась. – Казань : КХТИ им. С.М.Кирова, 1987. – 185 с.
40. Карев, Б.Н. Методы расчета безопасных расстояний при попутном движении транспортных средств : моногр. / Б.Н. Карев, Б.А. Сидоров, П.М. Недоростов. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2005. – 315 с.
41. Карев, Б.Н. Повышение безопасности эксплуатации автомобильного транспорта на основе математического моделирования : моногр. / Б.Н. Карев, Б.А. Сидоров. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2010. – 506 с.
42. Карпов, Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с Anylogic / Ю.Г. Карпов. – СПб : БХВ-Петербург, 2005. – 415 с.

43. Кисляков, В. М. Математическое моделирование и оценка условий движения автомобилей и пешеходов / В. М. Кисляков, В.В. Филлипов, И.А. Школяренко. – М. : Транспорт, 1975. – 200 с.
44. Клинковштейн, Г.И. Организация дорожного движения: учеб. для вузов / Г.И. Клинковштейн, М.Б. Афанасьев. – М. : Транспорт, 1992. – 247 с.
45. Красников, А.Н. Закономерности движения на многополосных автомобильных дорогах / А.Н. Красников. – М. : Транспорт, 1988. – 81с.
46. Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения: учебник для вузов Ю. А. Кременец, М.П. Печерский, М.Б. Афанасьев. – М.: ИКЦ Академкнига, 2005. – 356 с.
47. Ланцберг, Ю.С. Городские площади, улицы и дороги / Ю.С. Ланцберг. – М. : Стройиздат, 1983. – 216 с.
48. Левашев, А.Г. К вопросу о применении методик расчета пропускной способности нерегулируемых пересечений в России / А.Г. Левашев. – Иркутск : ИрГТУ, 2004.– 4 с.
49. Левашев, А.Г. Проектирование регулируемых пересечений: учеб. пособие / А.Г. Левашев, А.Ю. Михайлов, И.М. Головных. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2007. – 208 с.
50. Липницкий, А. С. Повышение эффективности организации дорожного движения на основе применения компактных кольцевых пересечений: дис. канд. техн. наук: 05.22.10 / А.С. Липницкий – Иркутск, 2010. – 223 с.
51. Лобанов, Е.М. Исследование пропускной способности нерегулируемых узлов автомобильных дорог в одном уровне : дис... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Е.М. Лобанов. – М., 1965 – 278 с.
52. Лобанов, Е.М. Транспортная планировка городов : учеб. пособие / Е.М. Лобанов. – М. : Транспорт, 1990. – 239 с.
53. Лобанов, Е.М. Пропускная способность автомобильных дорог / Е.М. Лобанов, В.В. Сильянов, Ю.М. Ситников.– М. : Транспорт, 1970. – 152 с.

54. Луканин, В.Н. Автотранспортные потоки и окружающая среда / В.Н. Луканин, А.П. Буслаев, Ю.В. Трофименко, М.В. Яшина. – М. : ИНФРА-М, 1998. – 408 с.
55. Маркуц, В.М. Транспортные потоки автомобильных дорог и городских улиц. Ч. 1. Интенсивность и безопасность движения автомобилей, пропускная способность транспортных пересечений / В.М. Маркуц. – Тюмень, 2008. – 15 с.
56. Мартяхин, Д.С. Повышение пропускной способности при проектировании съездов городских транспортных развязок: дис... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Д.С. Мартяхин. – М. : МАДИ, 2008. – 156 с.
57. Менделеев, Г.А. Транспорт в планировке городов : учебное пособие / Г.А. Менделеев. – М. : МАДИ (ГТУ), 2005. – 134 с.
58. Меркулов, Е.А. и др. Проектирование дорог и сетей пассажирского транспорта в городах / Е.А. Меркулов и др. – М. : Стройиздат, 1970. – 115 с.
59. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог : ОДМ 218.2.020–2012. Утв. распоряжением Федерального дорожного агентства от 17.02.2012 № 49-р. – М. : Росавтодор, 2012. – 109 с.
60. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах: ОДМ 218.6.003 – 2011: утв. распоряжением Федерального дорожного агентства от 27.02.13 № 236-р. – М. : Росавтодор, 2013. – 69 с.
61. Михайленко, В.И. Управление движением на автомобильных дорогах: Монография / В.И. Михайленко, Б.М. Четверухин. – Киев : Урожай, 1991. – 200 с.
62. Михайлов, А.Ю. Научные основы проектирования улично-дорожных сетей : автореф. дис.... на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / А.М. Михайлов. – М. : МАДИ, 2004. – 38 с.
63. Михайлов, А.Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов / А.Ю. Михайлов, Головных И.М. – Иркутск : Наука, 2004. – 267 с.

64. Михалёва, Л.В. Влияние динамики транспортных средств на безопасность дорожного движения: моногр. / Л.В. Михалёва, Б.Н. Карев, Б.А. Сидоров. Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2008. – 209 с.
65. Нейлор, Т. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем / Т. Нейлор.– М. : «Мир», 1975. – 504 с.
66. Новаковский, М. Транспорт и проектирование центра города: перевод с польского / М. Новаковский. – М., 1978. – 202 с.
67. Об автомобильных дорогах и дорожной деятельности в Российской Федерации. Федеральный закон от 8 ноября 2007г. № 257 – ФЗ // Рос. газета. – 2007. – 14 ноября.
68. Овечников, Е.В. Городской транспорт / Е.В. Овечников, М.С. Фишельсон.– М. : Высшая школа, 1976. – 352 с.
69. Овчаров, Л.А. Прикладные задачи теории массового обслуживания / Л.А. Овчаров. – М. : Машиностроение, 1969. – 324 с.
70. Орнатский, Н.П. Проектирование городских скоростных дорог / Н.П. Орнатский. – М. : Высшая школа, 1974. – 124 с.
71. Островский, В. Современное градостроительство: пер. с польск. / В. Островский, В.В. Владимиров. – М. : Стройиздат, 1979. – 359 с.
72. Падня, В.А. Применение теории массового обслуживания на транспорте / В.А. Падня. – М. : Транспорт, 1978. – 176 с.
73. Пересечения и примыкания автомобильных дорог в одном уровне: ТПР 503-0-51-89: утв. Минтрансстроем СССР, протокол от 19.06.89 №ЛВ-307 // Normacs: система нормативов. URL: <http://www.normacs.ru/Doclist/doc/10F25.html>. (дата обращения: 15.01.2014).
74. Петров, В.Ю. Анализ режимов работы улично-дорожной сети крупных городов на примере города Перми / В.Ю. Петров, М.Ю. Петухов, М.Р. Якимов. – Пермь : Пермский государственный технический университет, 2004 – 275 с.

75. Поздняков М. Н. Совершенствование организации движения на кольцевых пересечениях : автореф. дис.... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Поздняков Михаил Николаевич – Волгоград, 2005. – 164 с.
76. Поляков, А.А. Организация движения на улицах и дорогах / А.А. Поляков. – М. : Транспорт, 1965. – 374 с.
77. Правила классификации автомобильных дорог в Российской Федерации и их отнесения к категориям автомобильных дорог [Электронный ресурс]. утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 28 сентября 2009 г. №767 // Правовой сайт КонсультантПлюс. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=92016>.(дата обращения: 08.11.2013).
78. Применение теории массового обслуживания в проектировании дорог/ Я.А. Калужский, И.В. Бегма, В.М. Кисляков, В.В. Филиппов. – М. : «Транспорт», 1969. – 81 с.
79. Проектирование и изыскания пересечений автомобильных дорог / Е. М. Лобанов, В. М. Визгалов и др. – М. : Транспорт, 1972. – 232 с.
80. Пугачев, И. Н. Дорожная и психофизиологическая экспертизы дорожно-транспортных происшествий : учеб. пособие / И.Н. Пугачев, П.А. Пегин. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2008. – 106 с.
81. Пугачёв, И. Н. Организация движения автомобильного транспорта в городах : учеб. пособие / И. Н. Пугачёв. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2005. – 196 с.
82. Рахмангулов, А.Н. Выбор оптимальных методов оперативного управления работой промышленных транспортных систем : монография / А.Н. Рахмангулов, С.В. Трофимов. – Магнитогорск : МГТУ им. Г.И. Носова, 2000. – 145 с.
83. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах: ОДМ 218.4.005 – 2010: утв. распоряжением Федерального дорожного агентства от 12.01.2011 № 13-р. – М. : Росавтодор. – 2011. – 50 с.

84. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах: утв. распоряжением Минтранса России № ОС-557-р от 24.06.2002. – М. : Росавтодор, 2002.– 87 с.
85. Романов, А.Г. Дорожное движение в городах: закономерности и тенденции / А.Г. Романов.– М. : «Транспорт», 1984. – 80 с.
86. Рузавин, Г.И. Методология научного исследования : учеб. пособие для вузов / Г.И. Рузавин. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 1999. – 317 с.
87. Руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог. М. : «Транспорт», 1982. – 180 с.
88. Руководство по проектированию городских улиц и дорог / ЦНИИП градостроительства. – М. : Стройиздат, 1980. – 222 с.
89. Руководство по проектированию городских улиц и дорог/ ЦНИИП. – М. : Стройиздат, 1974. – 213 с.
90. Руне Эльвик. Справочник по безопасности дорожного движения/ Пер. с норв. под редакцией проф. В.В. Сильянова // Руне Эльвик, Аннэ Боргер Мюсен, Трулс Ваа. – М.: МАДИ(ГТУ), 2001. – 754 с.
91. Самойлов, Д.С. Городской транспорт / Д.С. Самойлов.– М. : Стройиздат, 1983. – 384 с.
92. Самойлов, Д.С. Организация и безопасность городского движения / Д.С. Самойлов, В.А. Юдин, П.В. Рушевский. – М. : Высшая школа, 1981. – 256 с.
93. Семенов, В.В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса / В.В. Семенов. – М. : Ин-т прикладной математики им. М.В. Келдыша, 2004. – 44 с.
94. Семенов, В.В. Математическое моделирование транспортного потока на нерегулируемом пересечении / В.В. Семенов. М. : Ин-т прикладной математики им. М.В. Келдыша, 2004. – 44 с.
95. Семенов, В.В. Смена парадигмы в теории транспортных потоков / В.В. Семенов. – М., 2006. – 32 с.
96. Сигаев, А.В. Автотранспорт в планировке городов / А.В. Сигаев. – М. : Стройиздат, 1972. – 224 с.

97. Сигаев, А.В. Планировочные и транспортные проблемы городских агломераций / А.В. Сигаев. – М. : Стройиздат, 1978.– 152 с.
98. Сигаев, А.В. Проектирование улично-дорожной сети / А.В. Сигаев. – М. : Стройиздат, 1978.– 263 с.
99. Сильянов, В.В. Имитационное моделирование транспортных потоков в проектировании дорог : учебное пособие / В.В. Сильянов, В.М. Еремин, Л.И. Муравьева.– М. : МАДИ, 1981. – 120 с.
100. Сильянов, В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации дорожного движения / В.В. Сильянов. – М. : «Транспорт», 1977. – 303 с.
101. СНиП 2.05.02–85. Автомобильные дороги. Нормы проектирования / Госстрой СССР. – М. : Изд-во Госстроя СССР, 1986. – 52 с.
102. СНиП 2.07.01–89. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений / Минрегион России. – М. : 1992. – 56 с.
103. Ставничий, Ю.А. Транспортные системы городов / Ю.А. Ставничий. – М. : Стройиздат, 1990.– 224 с.
104. Столяров, В.В. Проектирование автомобильных дорог по условию обеспечения безопасности движения с использованием теории риска: дис. ... на соиск. уч. ст. докт. техн. наук: 05.23.11 / В.В. Столяров. – Саратов – М., 1995. – 337 с.
105. Столяров, В.В. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска : учеб. пособие / В.В. Столяров. – Саратов : СГТУ, 1994. – 84 с.
106. Столяров, В.В. Проектирование пересечений автомобильных дорог в разных уровнях с учетом закономерностей движения транспортных потоков : дис... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / В.В. Столяров. – М., 1984. – 150 с.
107. Столяров, В.В. Теория риска в проектировании плана дороги и организации движения: учебное пособие / В.В. Столяров. – Саратов : Саратовский гос. техн. у-тет, 1995. – 215 с.
108. Страментов, А.Е. Городское движение / А.Е. Страментов, М.С. Фишельсон. – М. : Стройиздат, 1965. – 247 с.

109. Таха, Х. Введение в исследование операций : в 2-х кн. / Пер.с англ. / Х. Таха. – М. : Мир, 1985. – 479 с.
110. Технические указания по проектированию пересечений и примыканий автомобильных дорог: ВСН 103–74: утв. Главным техническим управлением Министерства транспортного строительства СССР 23 сентября 1974 г. – М. : «Транспорт», 1975. – 128 с.
111. Турчихин, Э.Я. Экономика строительства и эксплуатации городских дорог / Э.Я. Турчихин. – М. : Высшая школа, 1979. – 360 с.
112. Указания по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах: ВСН 25-86: утв. Министерством автомобильных дорог РСФСР 29 января 1986 г. – М. : Транспорт, 1988. – 56 с.
113. Фаянс, О.Г. Математические методы в управлении городскими транспортными системами / О.Г. Фаянс. – Л. : Наука, 1979. – 152 с.
114. Хейт, Ф. Математическая теория транспортных потоков / Ф. Хейт. – М. : Мир, 1966. – 288 с.
115. Хомяк, Я.В. Организация дорожного движения / Я.В. Хомяк. – Киев : Высшая школа, 1986. – 276 с.
116. Хомяк, Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог / Я.В. Хомяк. – М. : Транспорт, 1983. – 207 с.
117. Цариков А.А. Развитие методов расчета регулируемых узлов на улично-дорожной сети города: дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / А.А. Цариков. Екатеринбург, 2010. – 125 с.
118. Черепанов, В.А. Транспорт в планировке городов / В.А. Черепанов. – М. : Стройиздат, 1981.– 216 с.
119. Чумаков Д.Ю. Проектирование малых кольцевых пересечений в населенных пунктах: дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Д.Ю. Чумаков. – Волгоград, 2007. – 130 с.
120. Шварц, Г. Выборочный метод. Руководство по применению статистических методов оценивания / Г. Шварц, И. Г. Венецкий, В. М. Иванова. – М. : Статистика, 1978. – 213 с.

121. Шевяков, А.П. Влияние транспортных развязок в разных уровнях на режимы движения автомобилей: дис... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / А.П. Шевяков. – М., 1968. – 199 с.

122. Якимов, М.Р. Транспортные системы крупных городов. Анализ режимов работы на примере города Перми / М.Р. Якимов. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 184 с.

123. Ashworth R. A note on the selection of gap acceptance criteria for traffic simulation studies / Transportation Science Vol. 2 / R. Ashworth – 1968. – Pp. 171–175.

124. Ashworth R. The analysis and interpretation of gap acceptance data / Transportation Science Vol. 4 / R. Ashworth. – 1970. – Pp. 270–280.

125. Brilon ,W. Useful Estimation Procedures for Critical Gaps / Proc. of the third international Symposium on Intersections Without Traffic Signals / W. Brilon, R. Koenig, R.J. Troutbeck // Portland, Oregon, U.S.A. – 1997. – Pp. 71–87.

126. Cassidy, M.J. Unsignalized intersection Capacity and Level of Service: Revisiting CriticalGap Transportation Research Board / M.J. Cassidy, S.M. Madanat, M.H. Wang, F. Yang // 74 Annual Meeting, Washington D.C. – 1995. – Pp. 115-126

127. Greenshields, B.D. Traffic Performance at Urban Street Intersections. Technical Report No. 1. YaleBureau of Highway Traffic / B.D. Greenshields, D. Shapiro, E.L. Ericksen. – 1947. – 152 p.

128. Harders, J. Die Leistungsfähigkeit nicht signalgeregelter städtischer Verkehrsknoten / J. Harders // Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 76. Hrsg.: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßebau. – Bonn, 1976. – 174 p.

129. Harders, J. Grenz- und Folgezeitlücken als Grundlage für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Landstrassen / J. Harders // Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 216. Hrsg.: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßebau. – Bonn, 1968. – 128 p.

130. Hewitt, R.H. Analyse von Grenzzeitlücken durch Probit-Analyse / Straßenverkehrstechnik / R.H. Hewitt – 3/1993. – Pp. 142–148.

131. Maze, T.H. A probabilistic Model of Gap Acceptance Behavior / Transportation Research Record 795 TRB, National Research Council / T.H. Maze //– Washington, D.C. 1981. – Pp. 8–13.
132. Pucher, R. Die Aulage von kanalisierten Knotenpunkten auf Landstraßen / R. Pucher // Straße und Autobahn. – 1960. – 120 p.
133. Raff, M.S. A volume Warrant For Urban Stop Signs. Eno Foundation for Highway Traffic Control / M.S. Raff, J.W. Hart. – 1950. – 121 p.
134. Siegloch, W. Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung / W. Siegloch // Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 154. Hrsg.: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau. – Bonn, 1973. – P. 172
135. Teply, S. Gap acceptance behaviour – aggregate and logit perspectives: Part 2. Traffic Engineering & Control / S. Teply, M.I. Abou-Henaidy, J.D. Hunt. // October – 1997b. – Pp. 540–544.
136. Troutbeck, R.J. Estimating the Critical Acceptance from Traffic Movements / Research Report 92-5 / R.J. Troutbeck, // Queensland University of Technology, Brisbane. – 1992. – Pp. 118–125.
137. Weinert, A. Grenz- und Folgezeitlücken an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen / A. Weinert // Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Heft 23, Ruhr-Universität Bochum. – 2001. – Pp. 134–138.

Приложение А (информационное)



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего
профессионального образования
«Уральский государственный лесотехниче-
ский университет»
(УГЛТУ)

Сибирский тракт, д. 37,
Екатеринбург, 620100.
Тел. (343) 254-65-06. Факс (343) 262-96-38.

E-mail: general@usfeu.ru
ОКПО 02069243, ОГРН 1026605426814
ИНН/КПП 6662000973/667201001

№ _____
на № _____ от _____

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы
на тему «Повышение эффективности функционирования пересечений
автомобильных дорог с высоким значением коэффициента
загрузки движением», выполненной Боярским Сергеем Николаевичем для
представление на соискание ученой степени кандидата технических наук по
научной специальности 05.22.01 – «Транспортные и транспортно-
технологические системы страны, ее регионов и городов, организация
производства на транспорте»**

Настоящий акт свидетельствует о том, что основные научно-практические положения диссертационного исследования старшего преподавателя кафедры экономики транспорта и логистики Боярского Сергея Николаевича применяются в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет» при чтении курсов «Автомобильные дороги», «Моделирование производственных процессов на транспорте» для студентов специальности 080502.65 «Экономика и управление на предприятии (транспорт)», магистров направления 190700.68 «Технология транспортных процессов».

РЕКТОР



А.В. Мехренцев

Ковалев Р.Н.,
д.т.н., профессор,
академик РАТ, член-корр. РАЕН,
зав. кафедрой ЭТиЛ
тел. 8(343) 262-96-26, e-mail: rkv@usfeu.ru

Приложение Б
(информационное)



**ООО «Научно-исследовательский центр
«ГИПРОДОРНИЙ»**

620026, г. Екатеринбург, ул. Луначарского, 203

E-mail: nauka-giprodomii@yandex.ru

Тел. (343) 261-75-77, 261-71-55

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы
на тему «Повышение эффективности функционирования пересечений
автомобильных дорог с высоким значением коэффициента
загрузки движением», выполняемой Боярским Сергеем Николаевичем для
представления на соискание ученой степени кандидата технических наук
по научной специальности 05.22.01 – «Транспортные и транспортно-
технологические системы страны, ее регионов и городов, организации
производства на транспорте»**

Настоящий акт свидетельствует о том, что основные научно-практические положения диссертационного исследования старшего преподавателя кафедры экономики транспорта и логистики Боярского Сергея Николаевича были внедрены при проектировании пересечений автомобильных дорог I–III технических категорий.

Предложенный Боярским С.Н. метод определения средней задержки транспорта на пересечении позволил обосновать выбор типа пересечений автомобильных дорог при проектировании и параметры циклов светофорного регулирования на уже существующих пересечениях.

Генеральный директор



В.Н. Дмитриев

Приложение В (информационное)

Результаты имитационного моделирования

Результаты имитационного моделирования для регулируемого пересечения представлены на рисунках В.1-В.12:

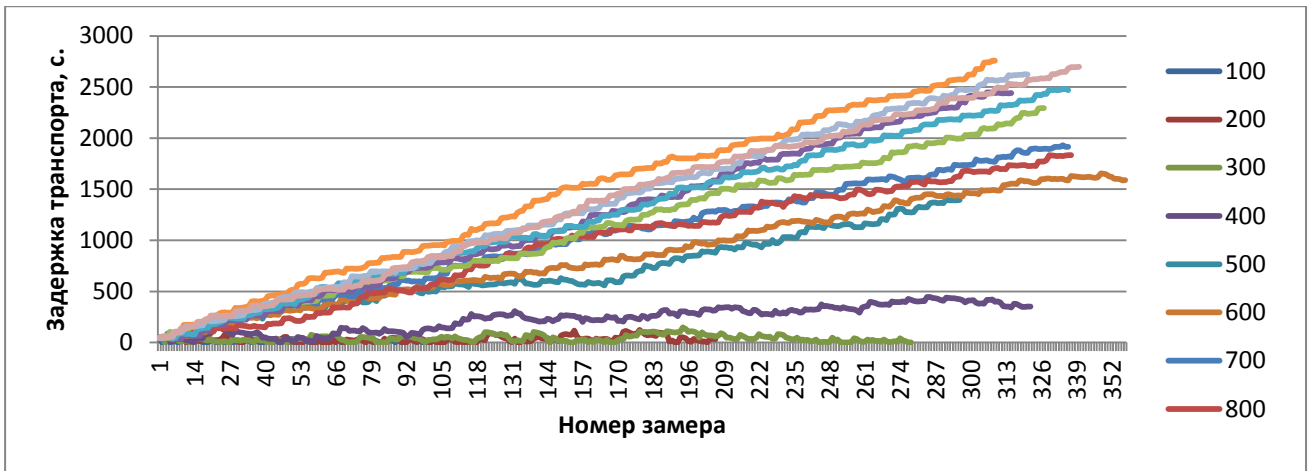


Рисунок В.11 – Задержка транспорта на правом повороте регулируемого пересечения при $T_{ц} = 70$ с

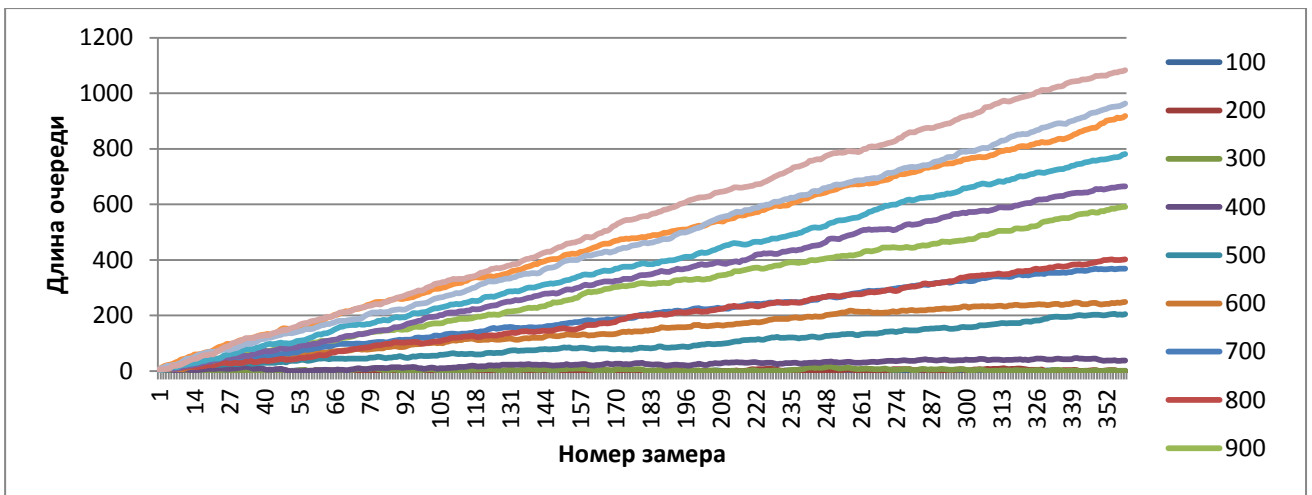


Рисунок В.2 – Длина очереди на правом повороте регулируемого пересечения при $T_{ц} = 70$ с

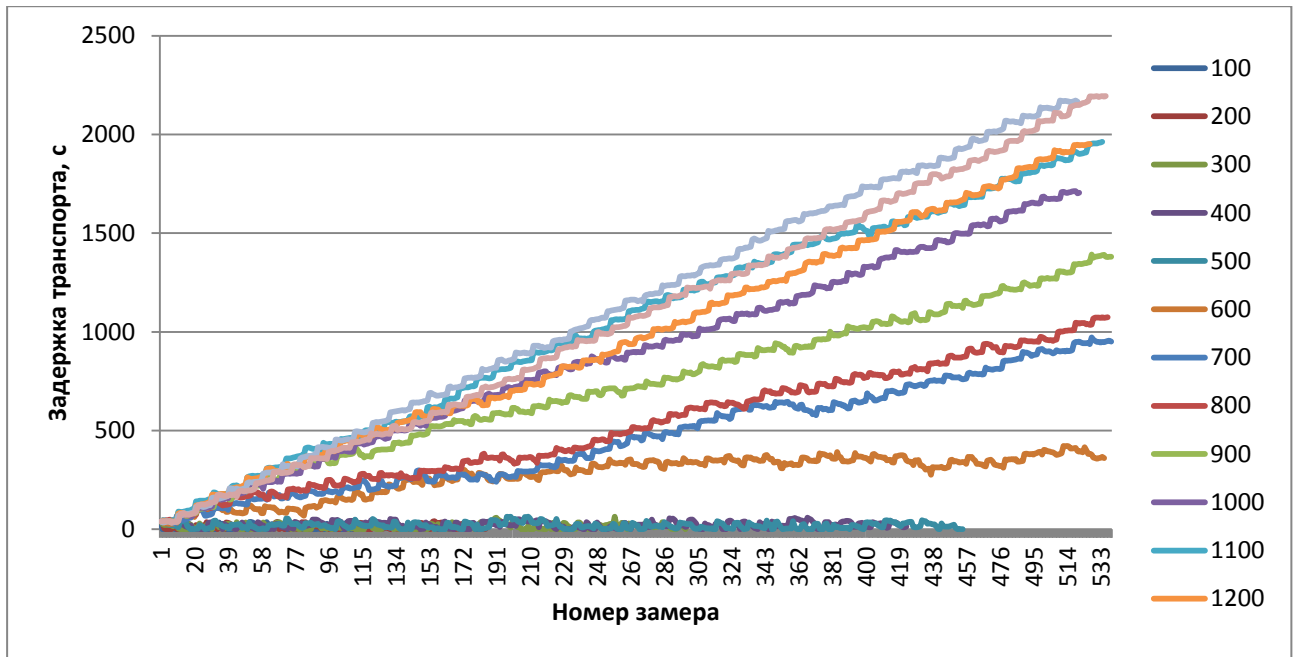


Рисунок В.3 – Задержка транспорта по направлению прямо-налево регулируемого пересечения при $T_{ц} = 70$ с

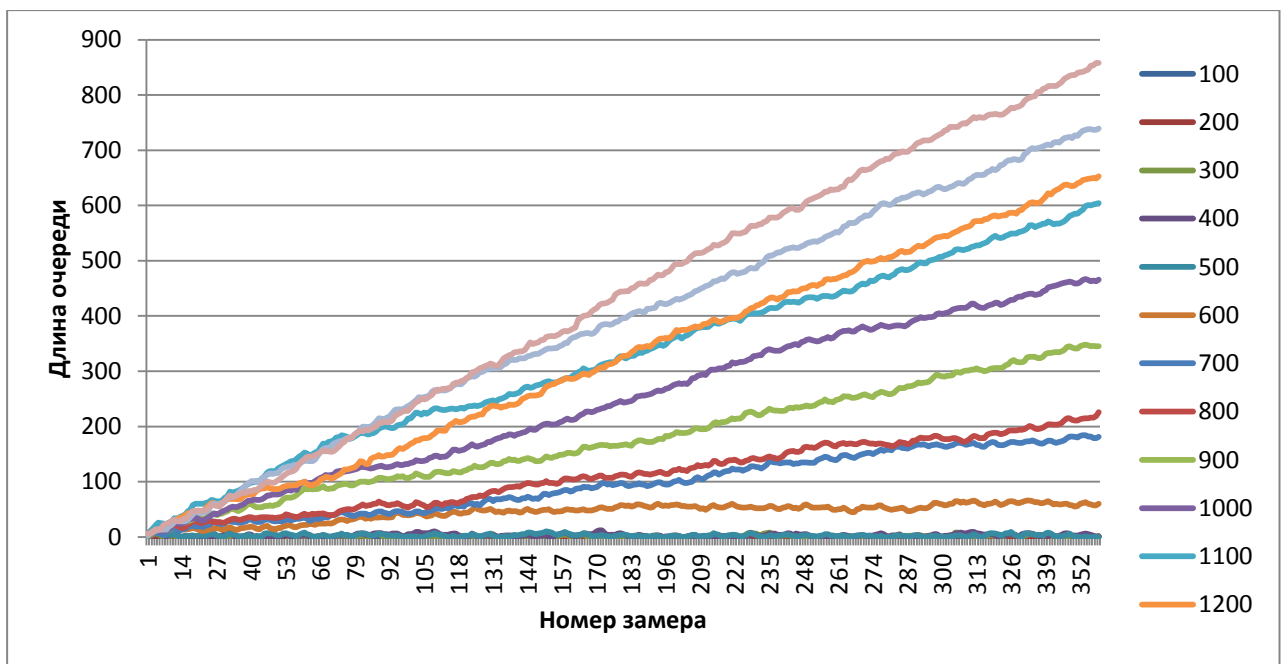


Рисунок В.4 – Длина очереди по направлению прямо-налево регулируемого пересечения при $T_{ц} = 70$ с

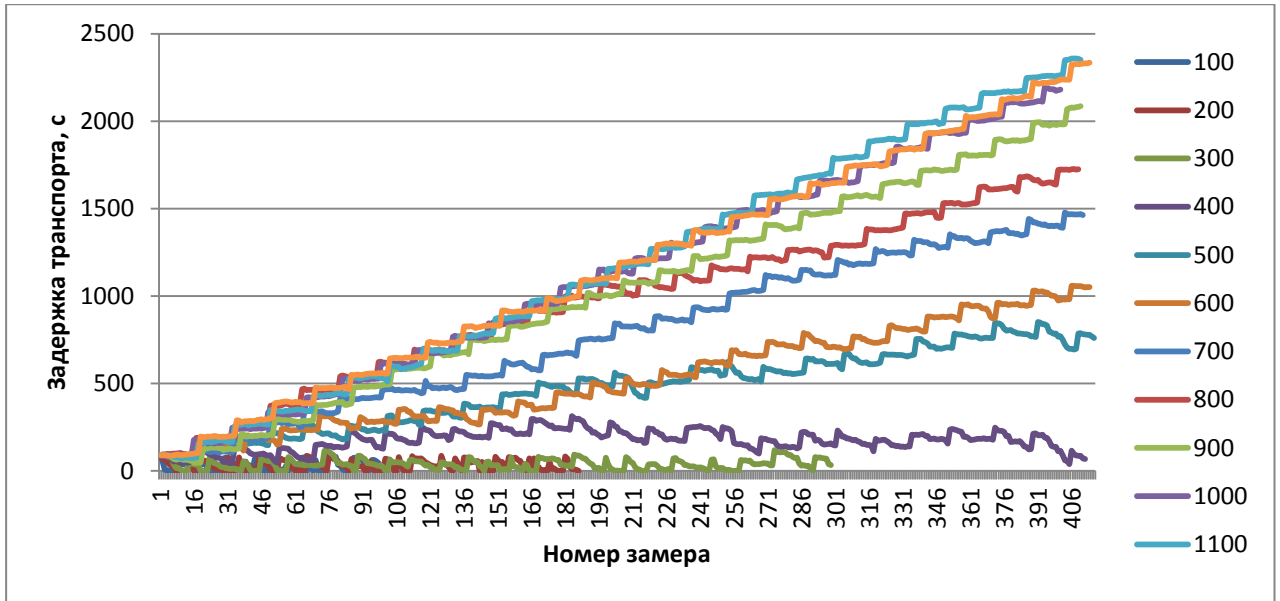


Рисунок В.5 – Задержка транспорта по направлению прямо-налево

регулируемого пересечения при $T_{ц} = 145$ с

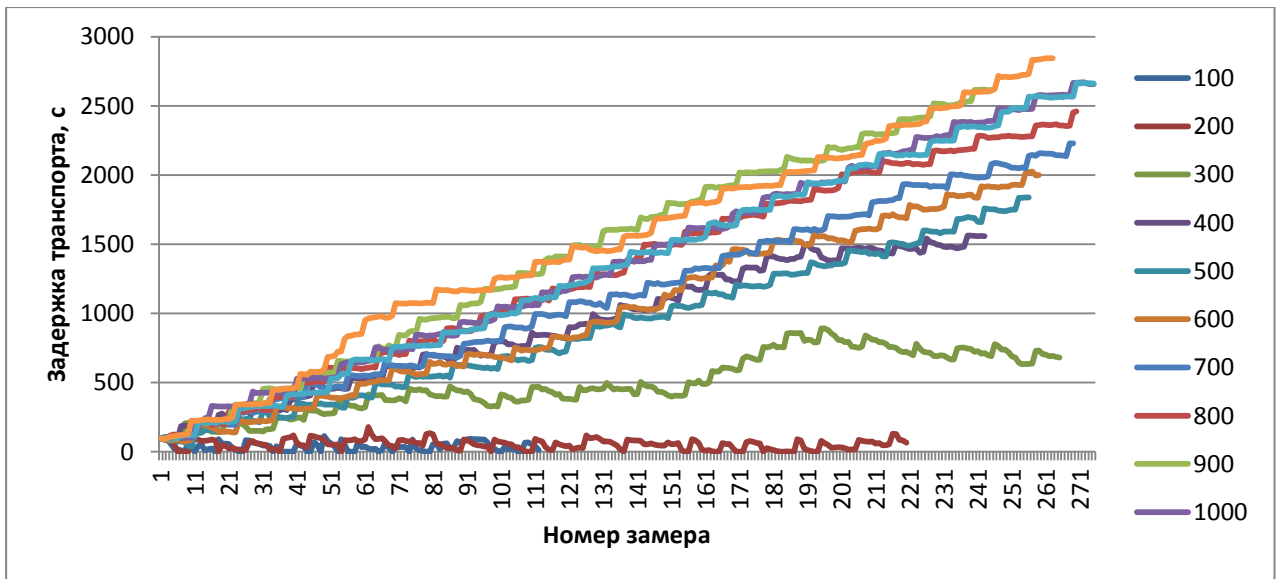


Рисунок В.6 – Задержка транспорта на правом повороте регулируемого

пересечения при $T_{ц} = 145$ с

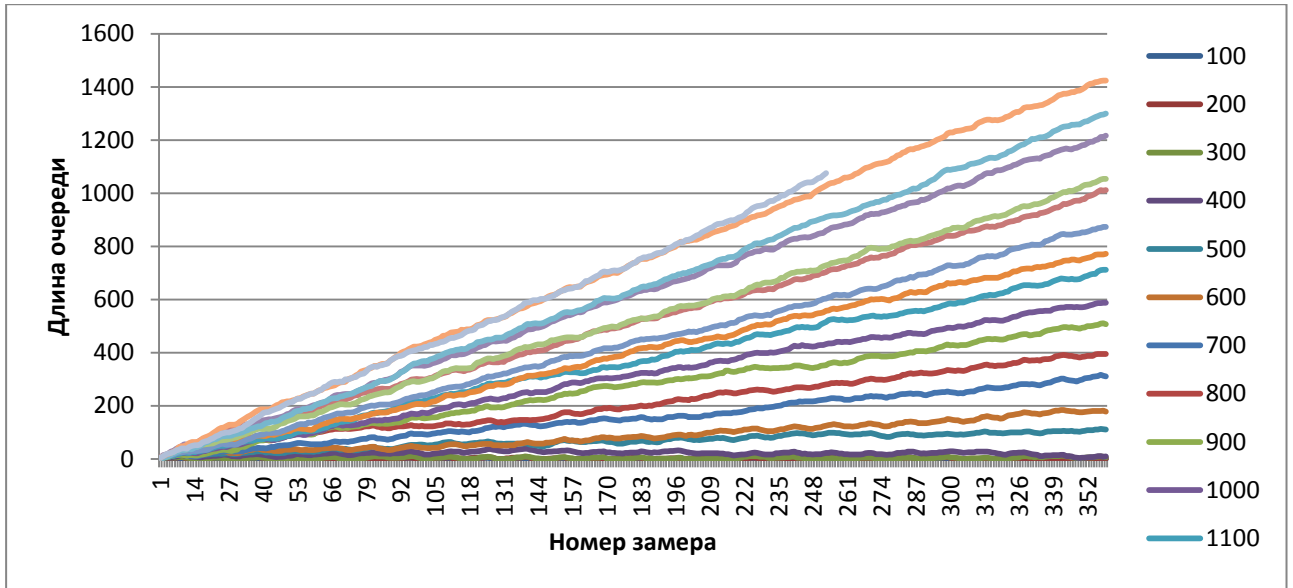


Рисунок В.7 – Длина очереди по направлению прямо-налево регулируемого пересечения при $T_{ц} = 145$ с

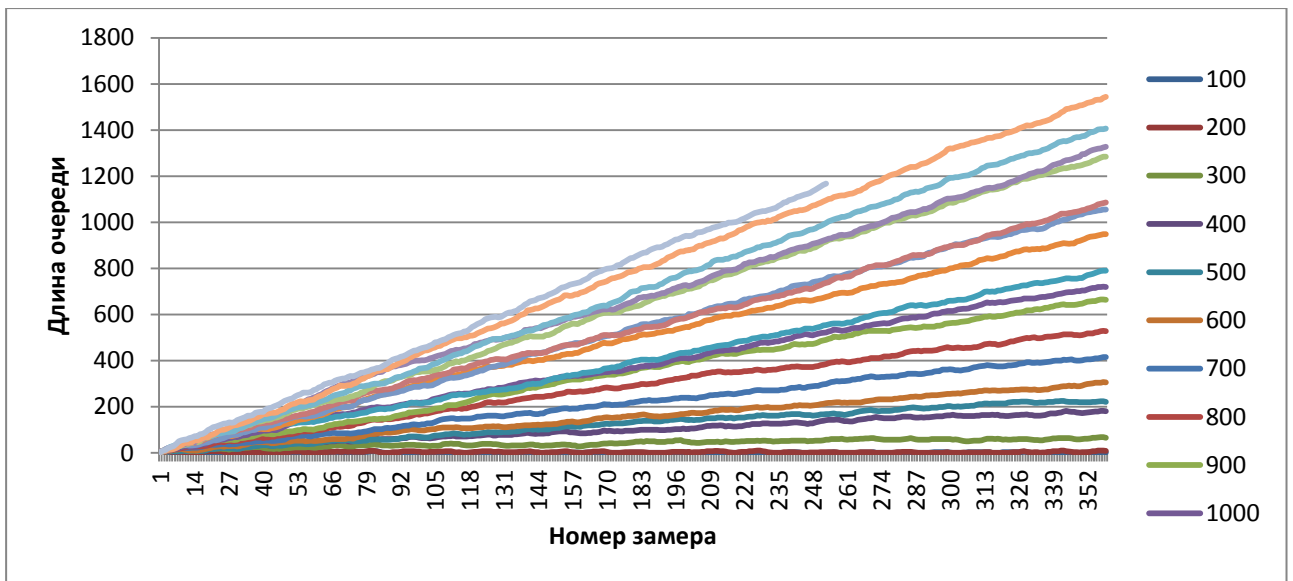


Рисунок В.8 – Длина очереди на правом повороте регулируемого пересечения при $T_{ц} = 145$ с

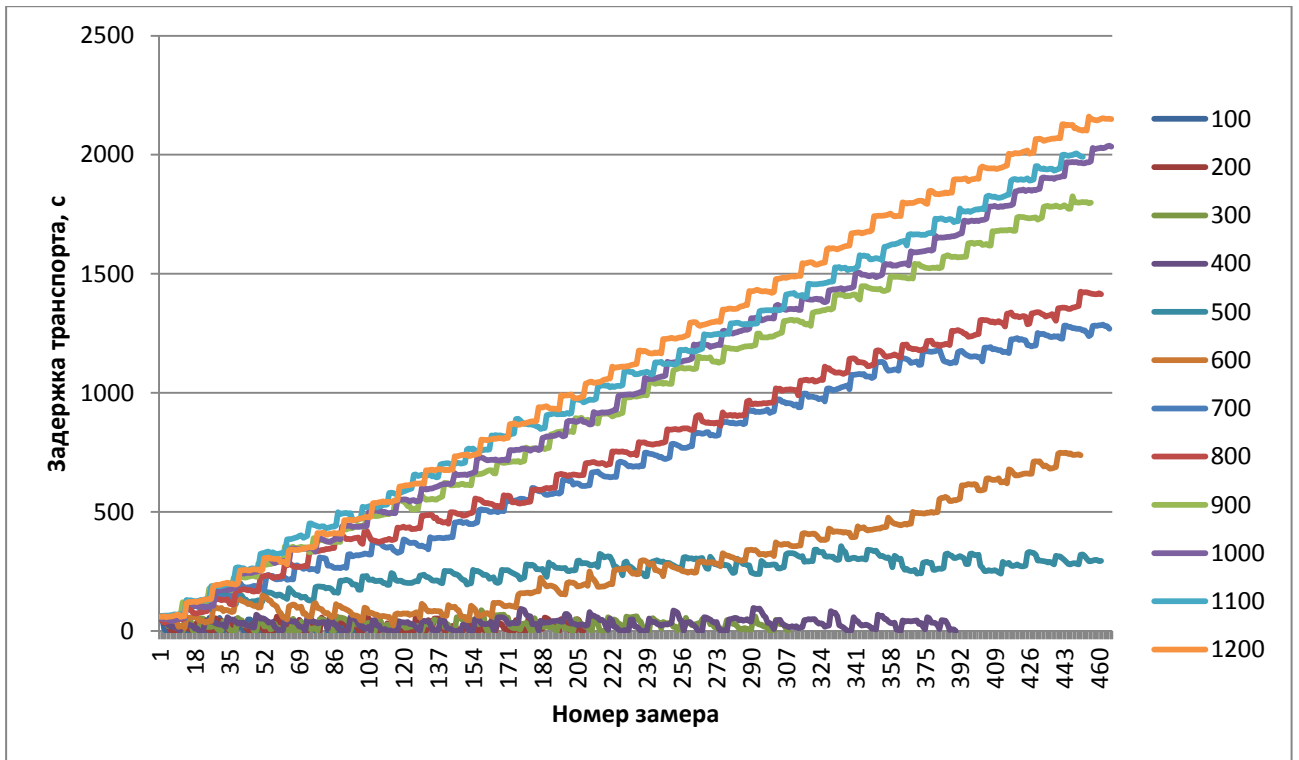


Рисунок В.9 – Задержка транспорта по направлению прямо-налево регулируемого пересечения при $T_{ц} = 100$ с

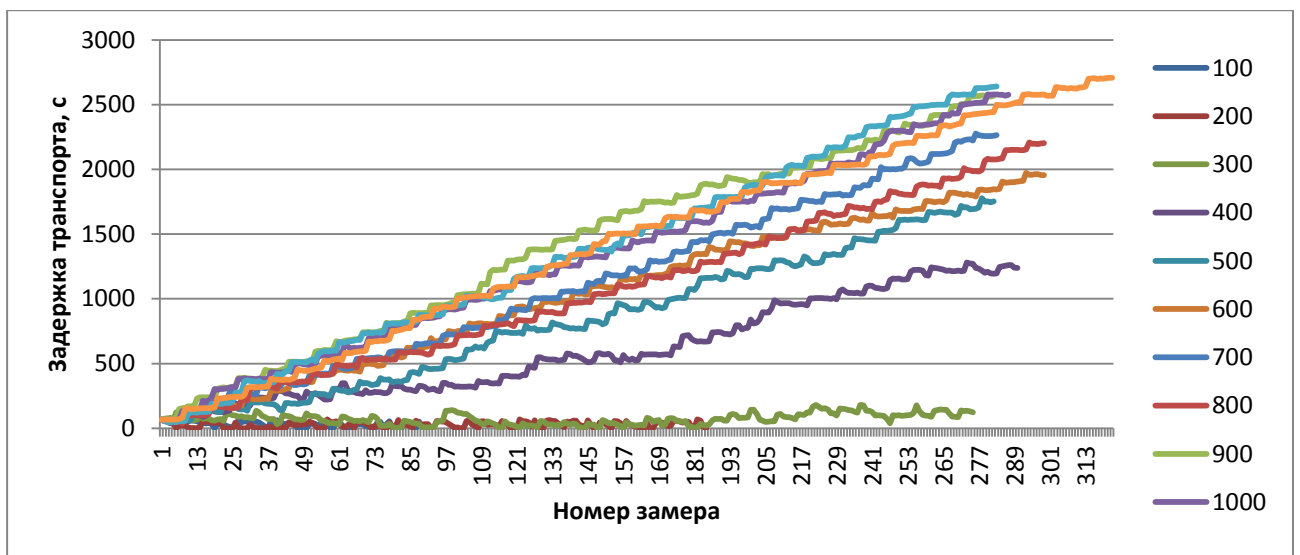


Рисунок В.10 – Задержка транспорта на правом повороте регулируемого пересечения при $T_{ц} = 100$ с

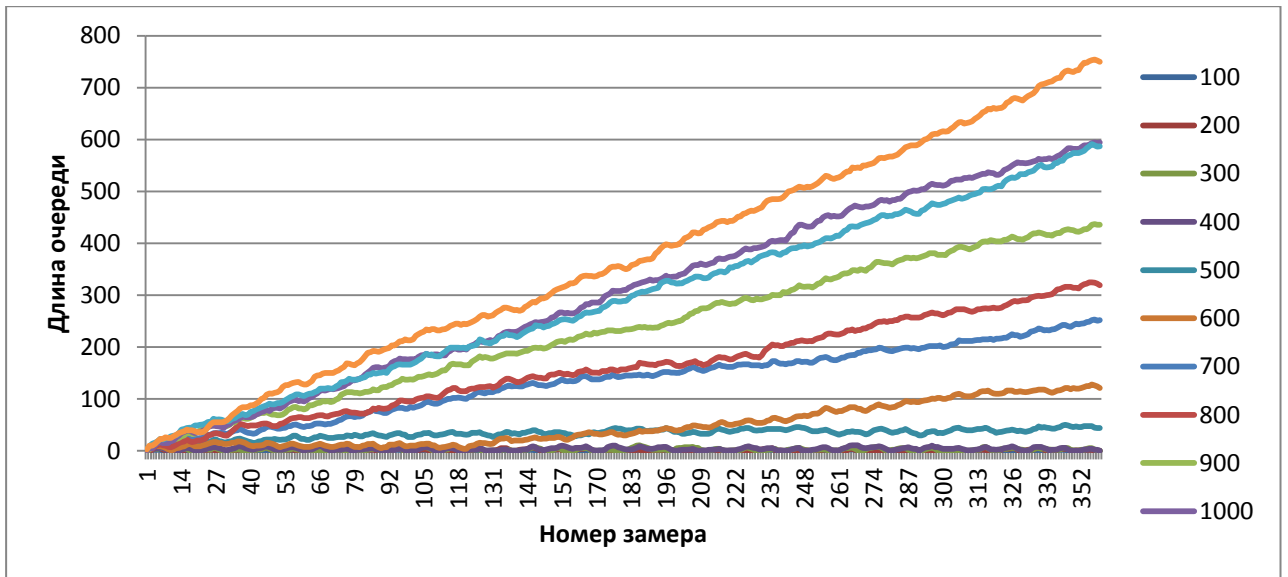


Рисунок В.11 – Длина очереди по направлению прямо-налево регулируемого пересечения при $T_{ц} = 100$ с

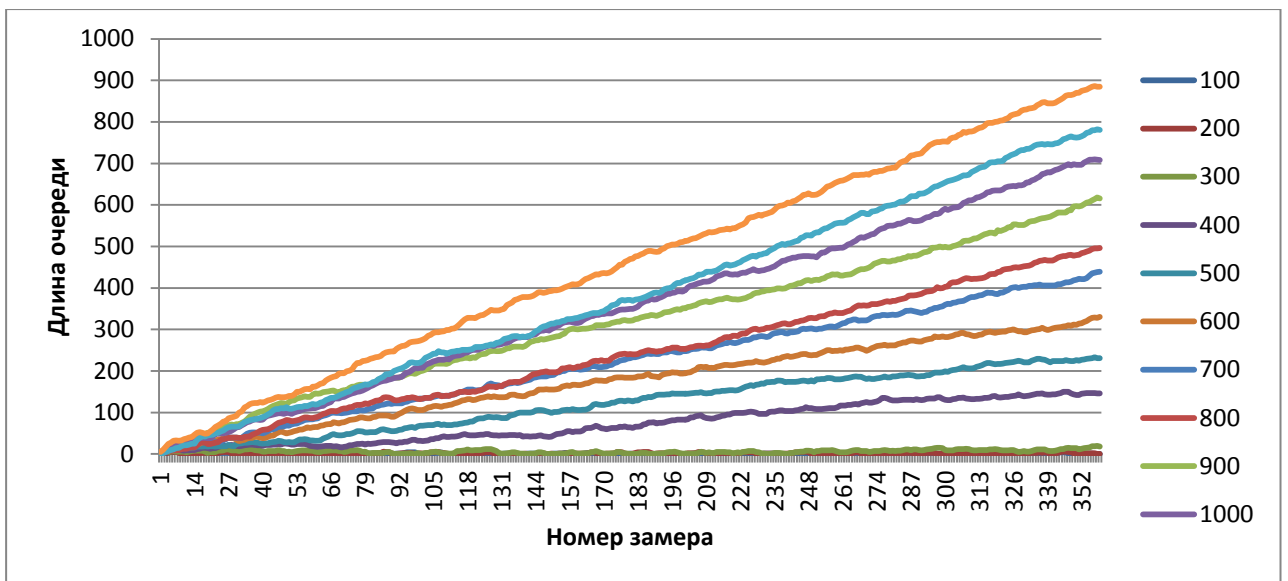


Рисунок В.12 – Длина очереди на правом повороте регулируемого пересечения при $T_{ц} = 145$ с

Результаты имитационного моделирования для нерегулируемого пересечения по направлению прямо-налево представлены на рисунках В.13-В.22

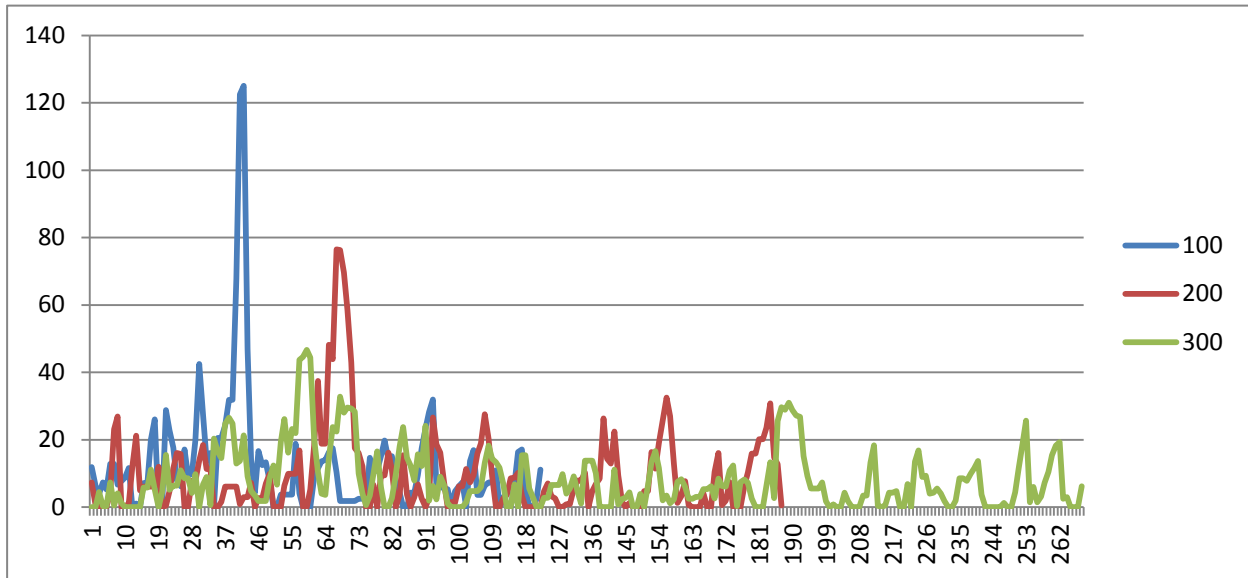


Рисунок В.13 – Задержка транспорта на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 300 авт./ч главной дороги

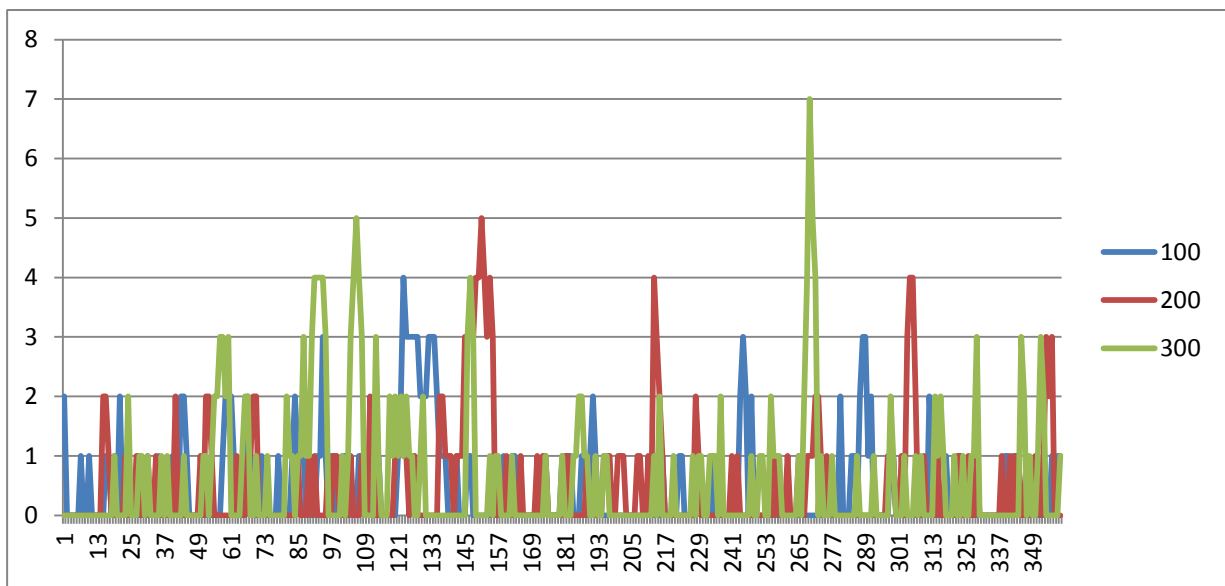


Рисунок В.14 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 300 авт./ч главной дороги

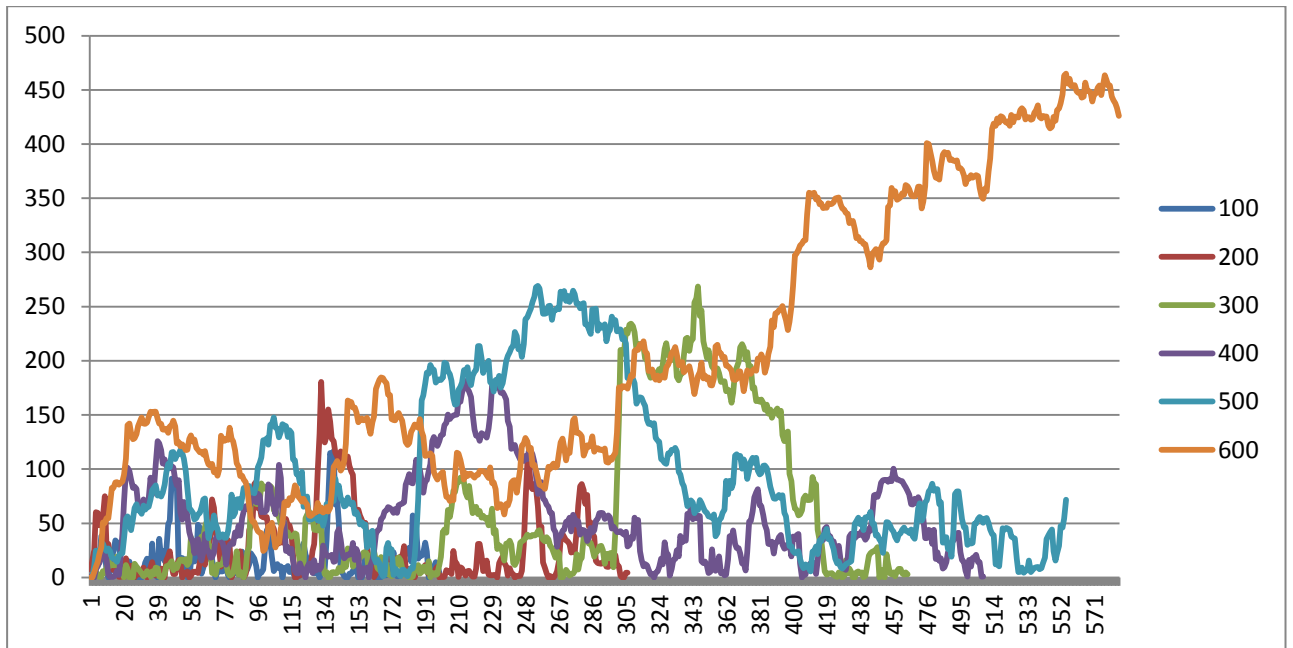


Рисунок В.15 – Задержка транспорта на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 600 авт./ч главной дороги

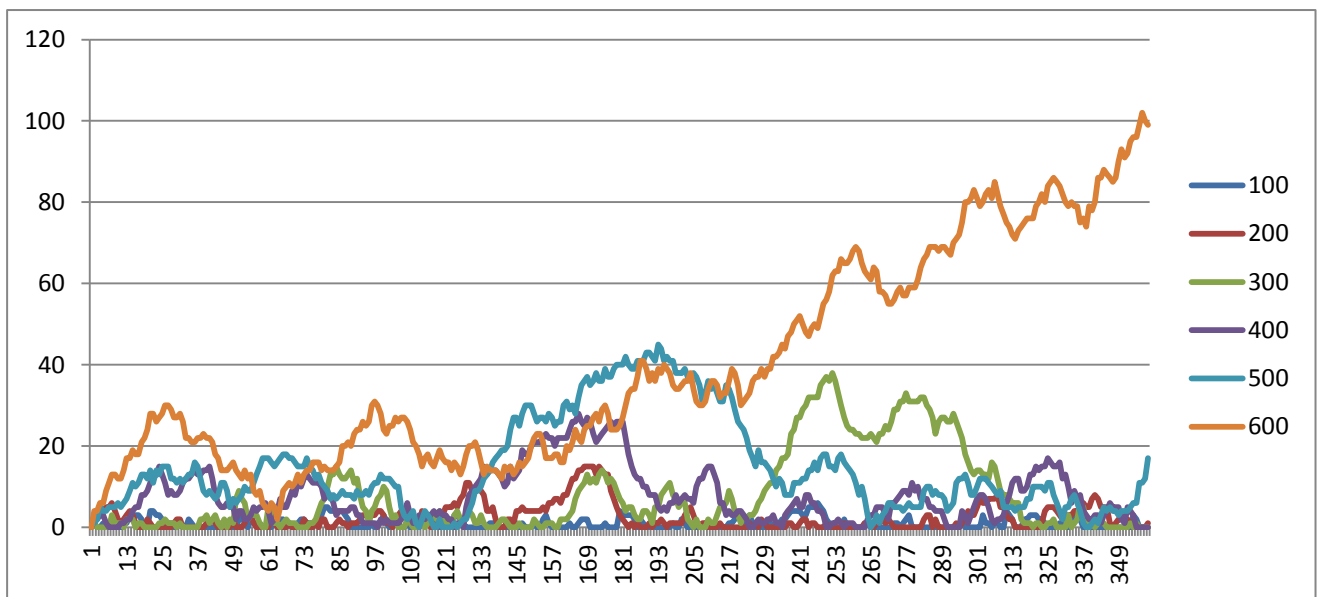


Рисунок В.16 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 600 авт./ч главной дороги

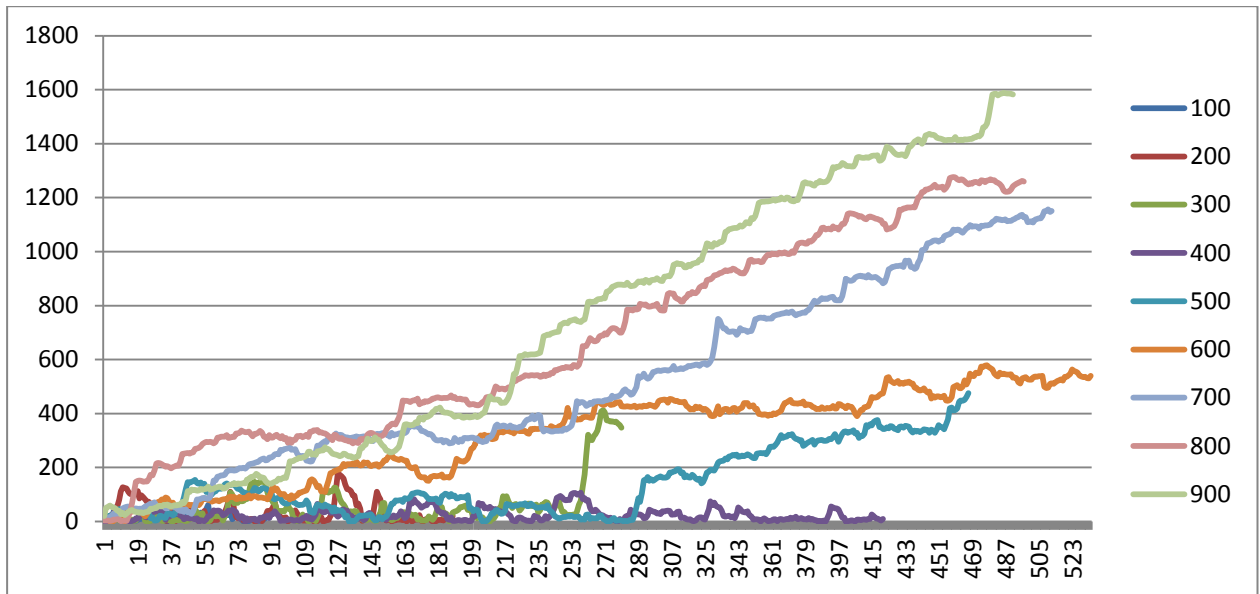


Рисунок В.17 – Задержка транспорта на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 900 авт./ч главной дороги

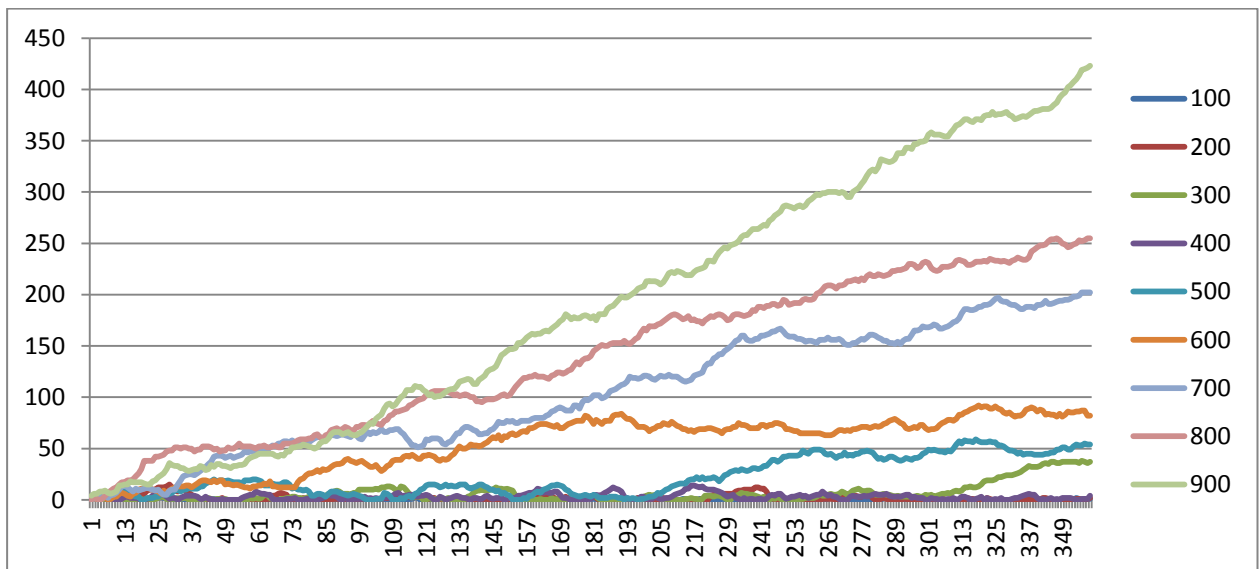


Рисунок В.18 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 900 авт./ч главной дороги

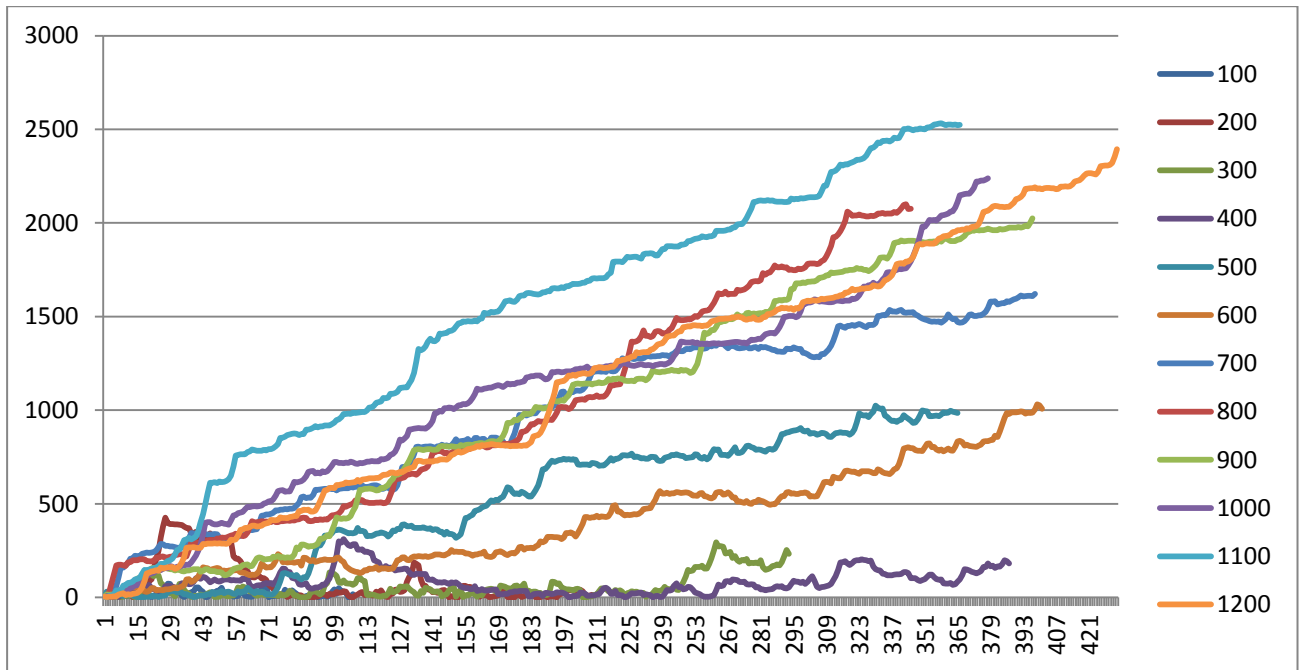


Рисунок В.19 – Задержка транспорта на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 1200 авт./ч главной дороги

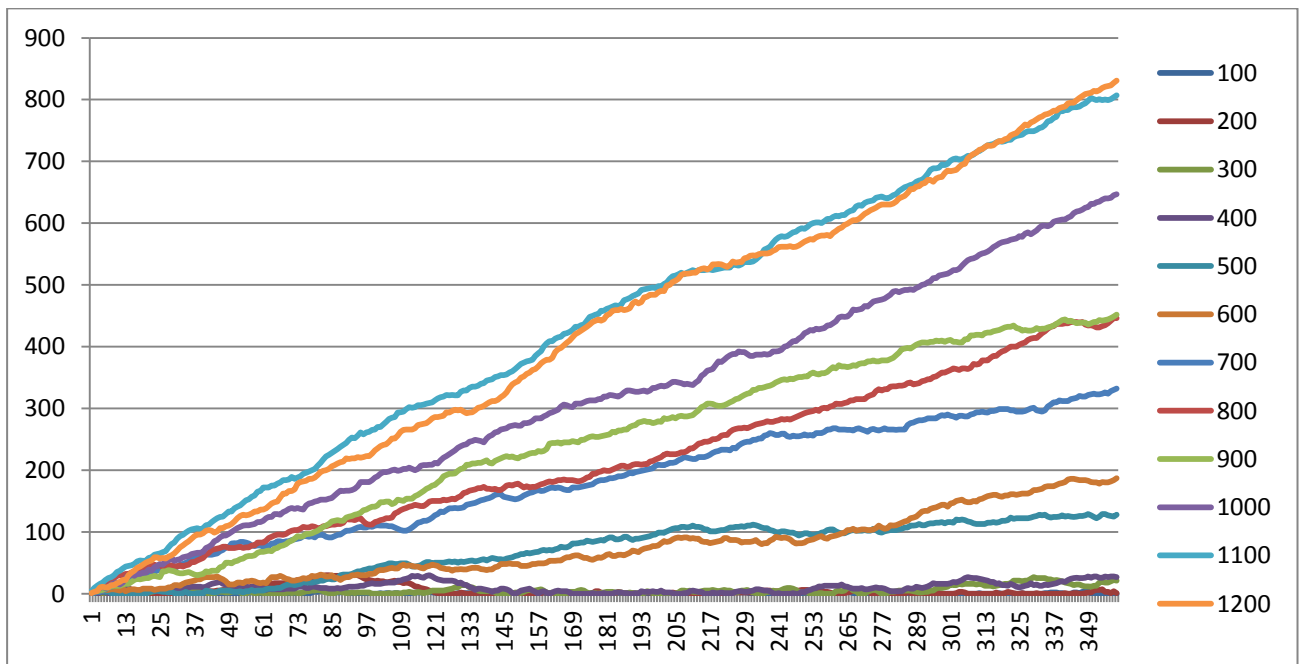


Рисунок В.20 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 1200 авт./ч главной дороги

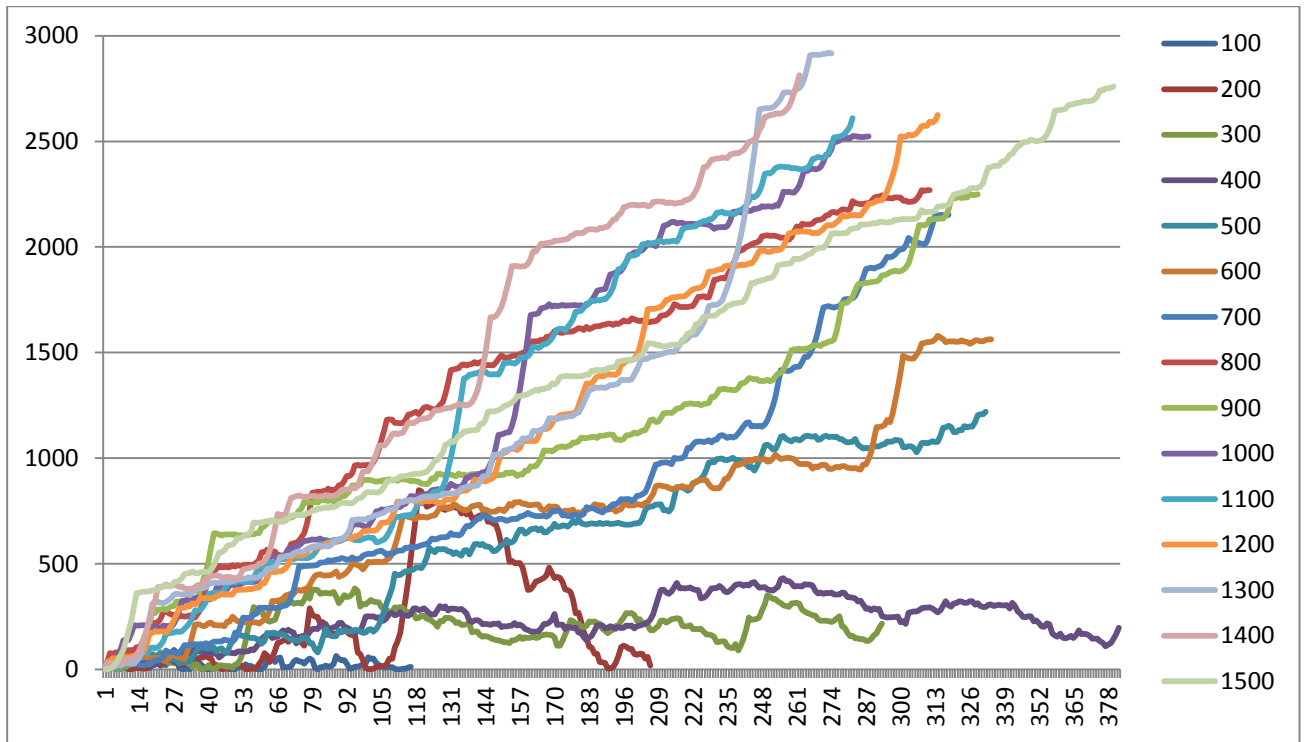


Рисунок В.21 – Задержка транспорта на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 1500 авт./ч главной дороги

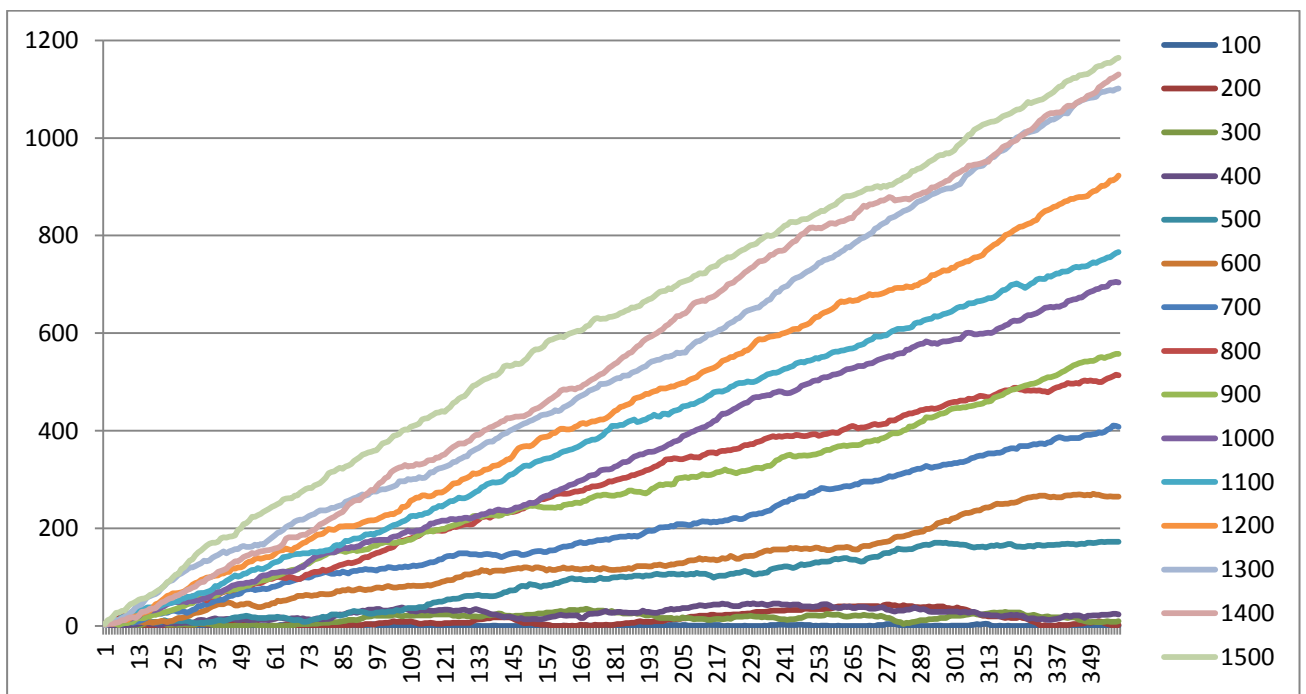


Рисунок В.22 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 1500 авт./ч главной дороги

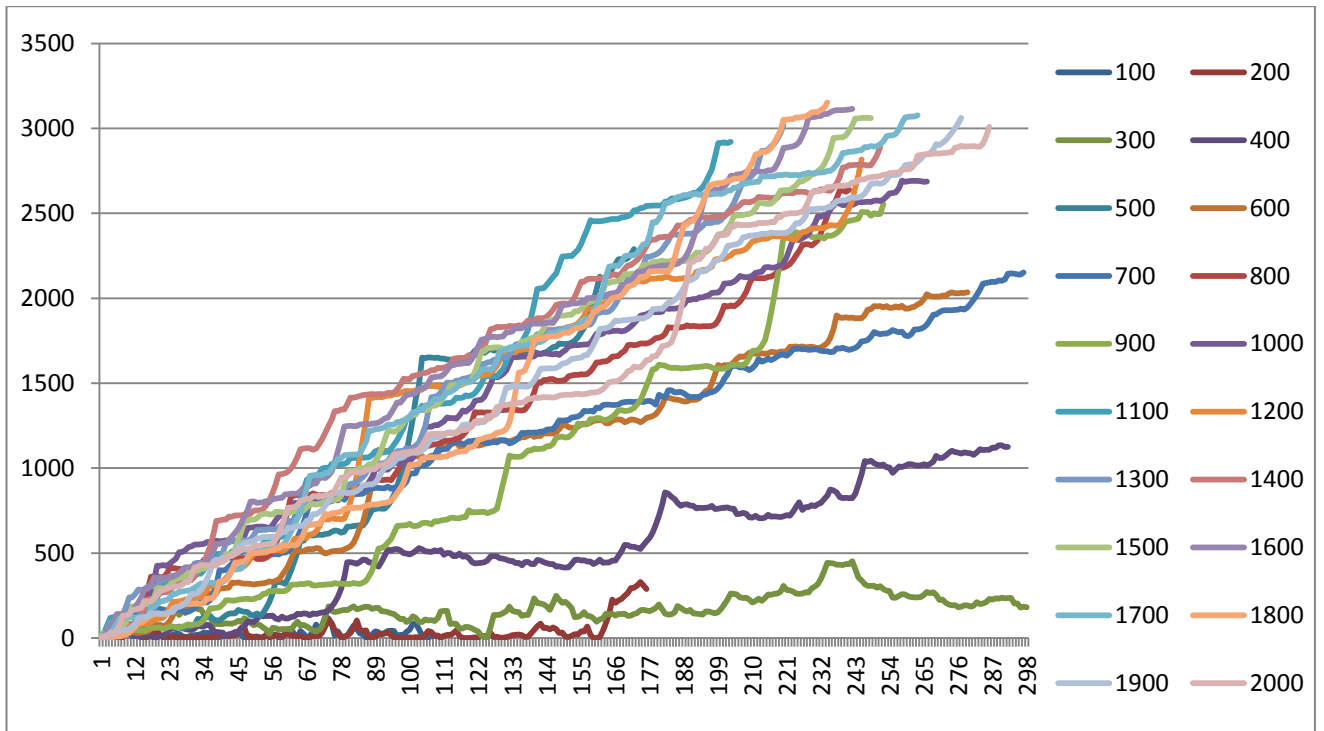


Рисунок В.23 – Задержка транспорта на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 2000 авт./ч главной дороги

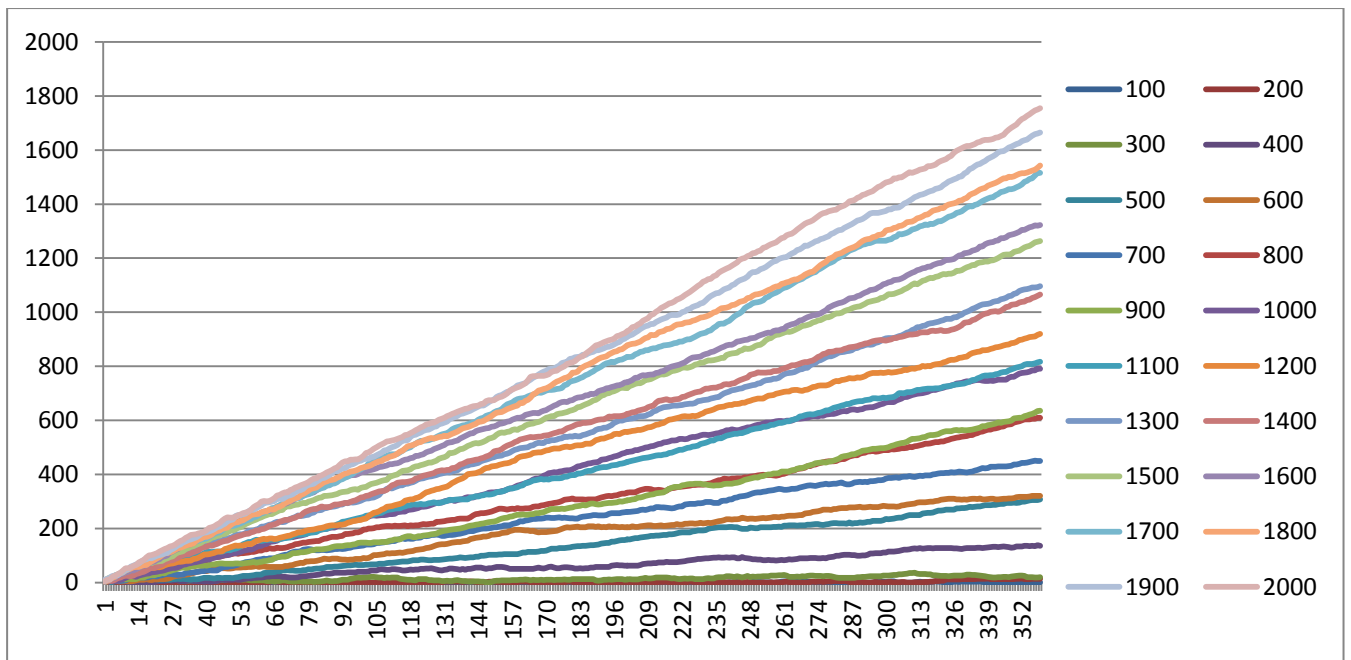


Рисунок В.24 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом пересечении по направлению прямо-налево при интенсивности 2000 авт./ч главной дороги

Результаты имитационного моделирования для нерегулируемого пересечения на правом повороте представлены на рисунках В.25-В.32

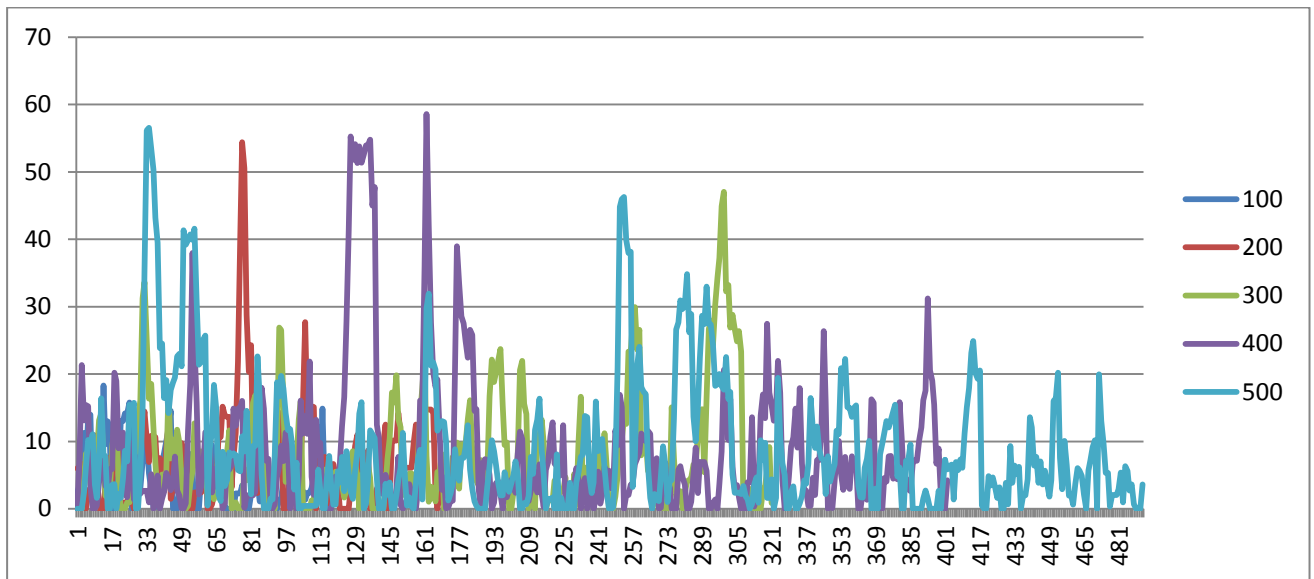


Рисунок В.25 – Задержка транспорта на нерегулируемом пересечении на правом повороте при интенсивности 500 авт./ч главной дороги

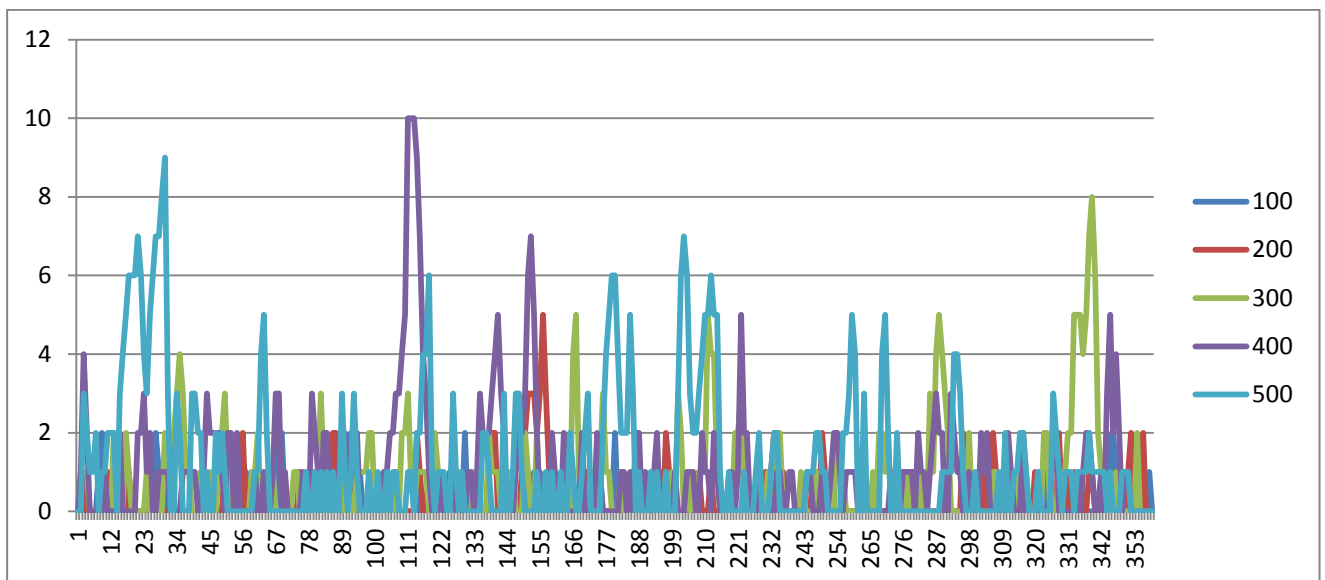


Рисунок В.26 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом пересечении на правом повороте при интенсивности 500 авт./ч главной дороги

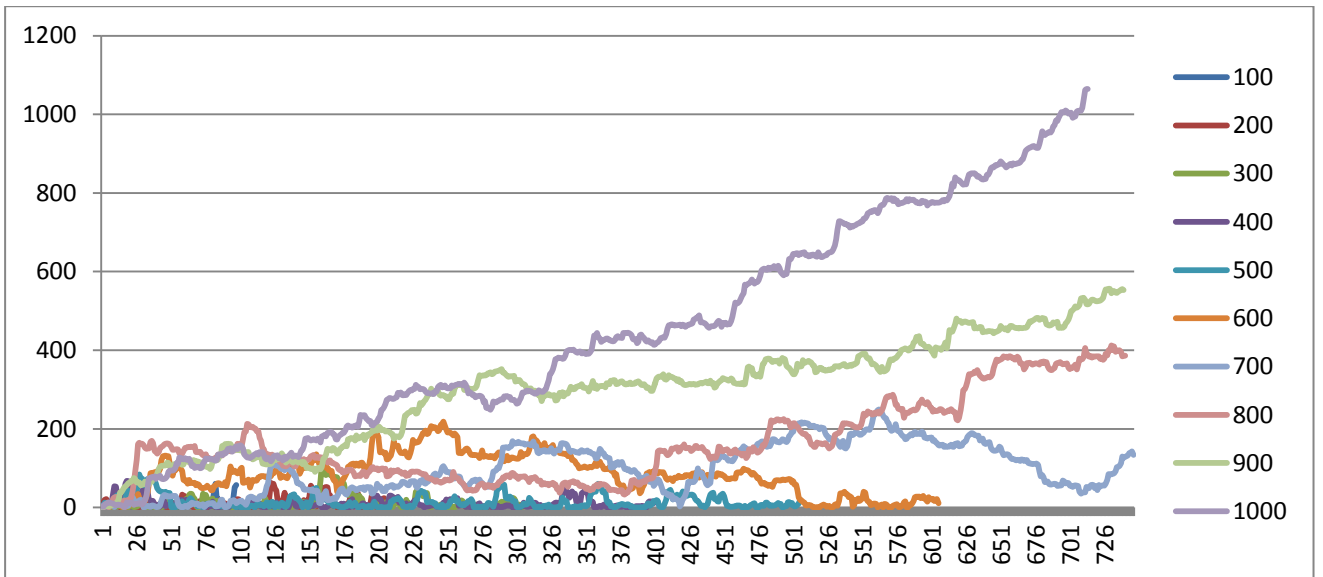


Рисунок В.27 – Задержка транспорта на нерегулируемом пересечении
на правом повороте при интенсивности 1000 авт./ч
главной дороги

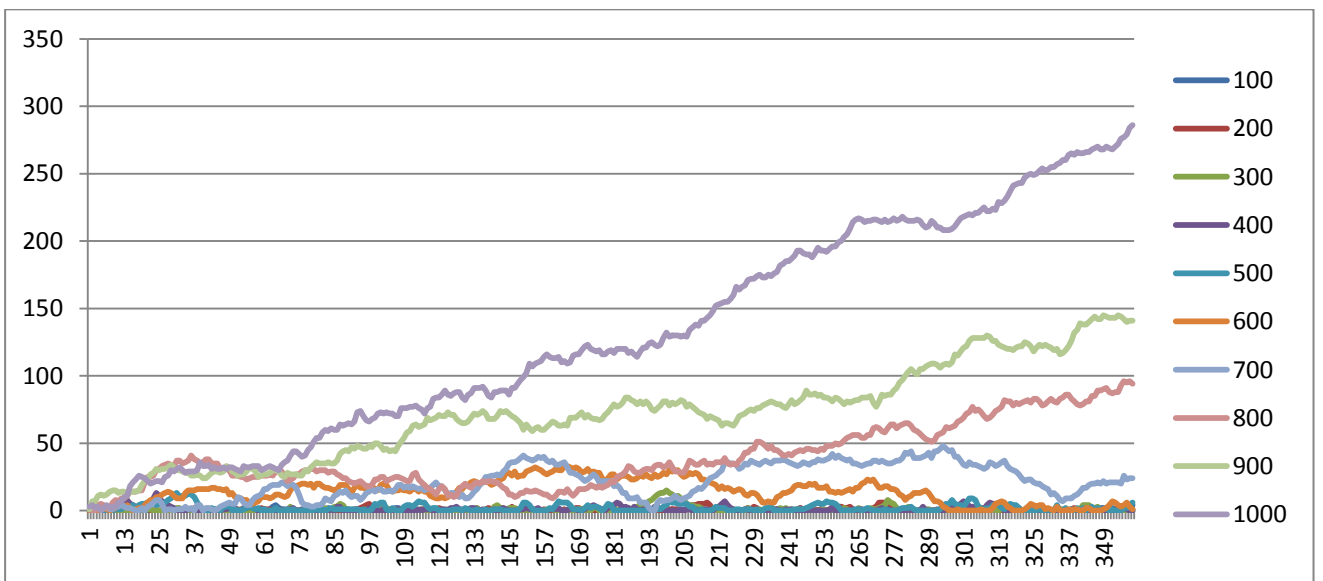


Рисунок В.28 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом
пересечении на правом повороте при интенсивности 1000 авт./ч
главной дороги

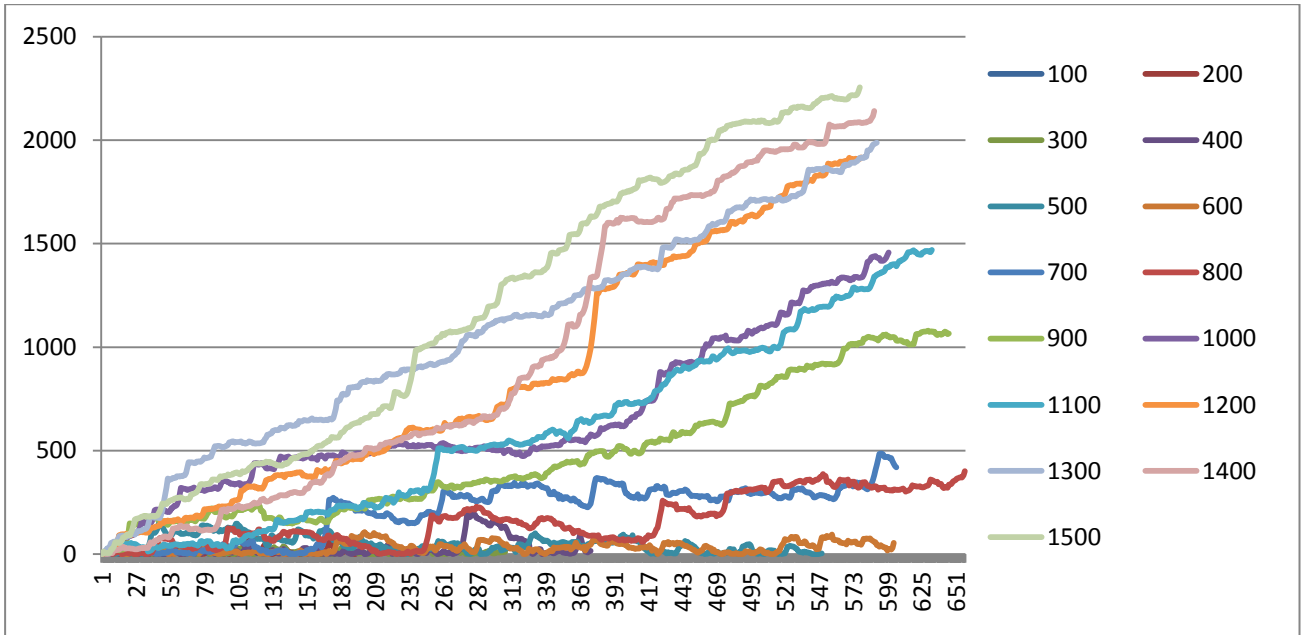


Рисунок В.29 – Задержка транспорта на нерегулируемом пересечении
на правом повороте при интенсивности 1500 авт./ч
главной дороги

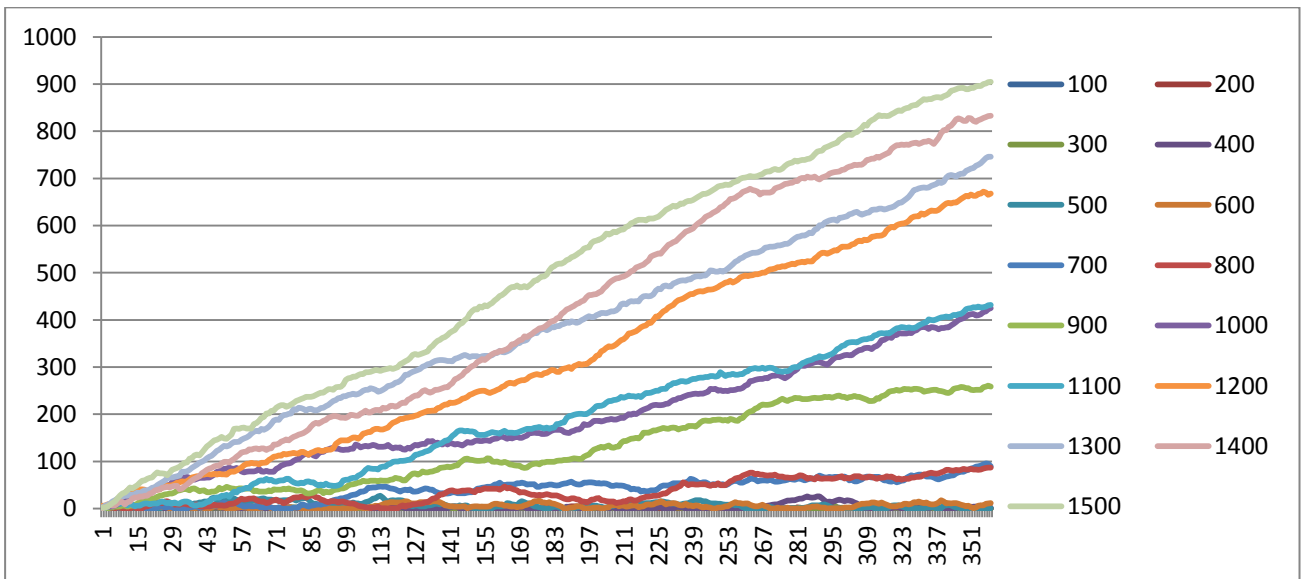


Рисунок В.30 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом
пересечении на правом повороте при интенсивности 1500 авт./ч
главной дороги

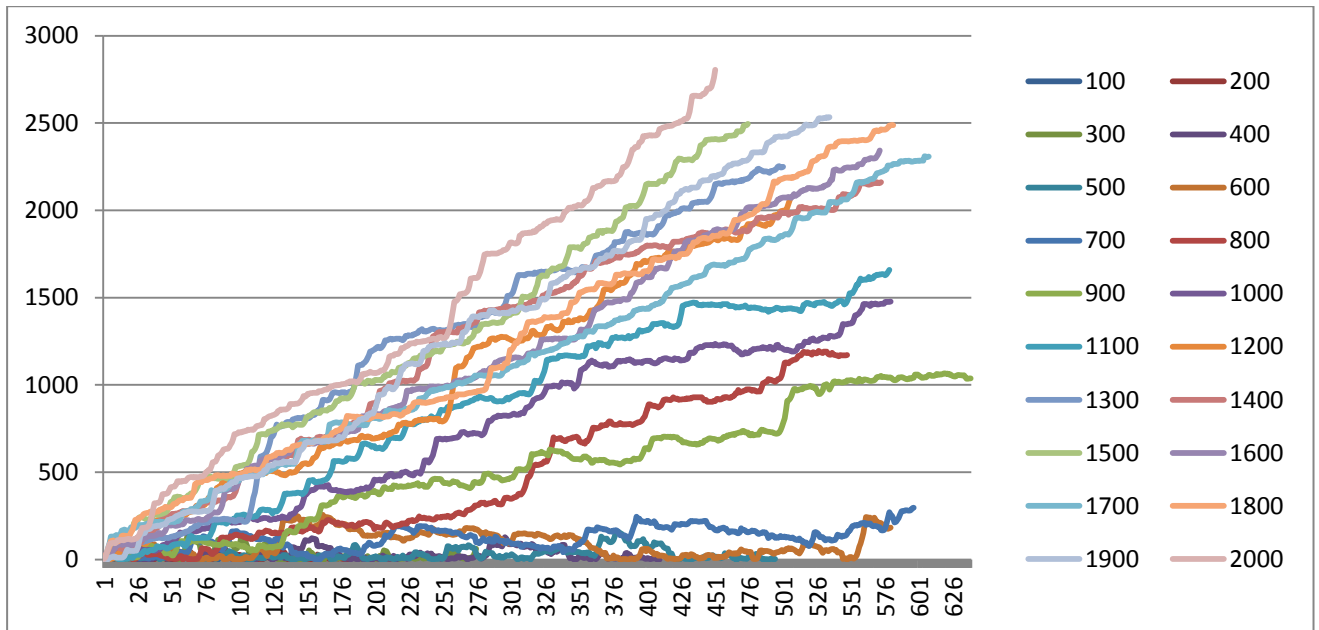


Рисунок В.31 – Задержка транспорта на нерегулируемом пересечении на правом повороте при интенсивности 2000 авт./ч главной дороги

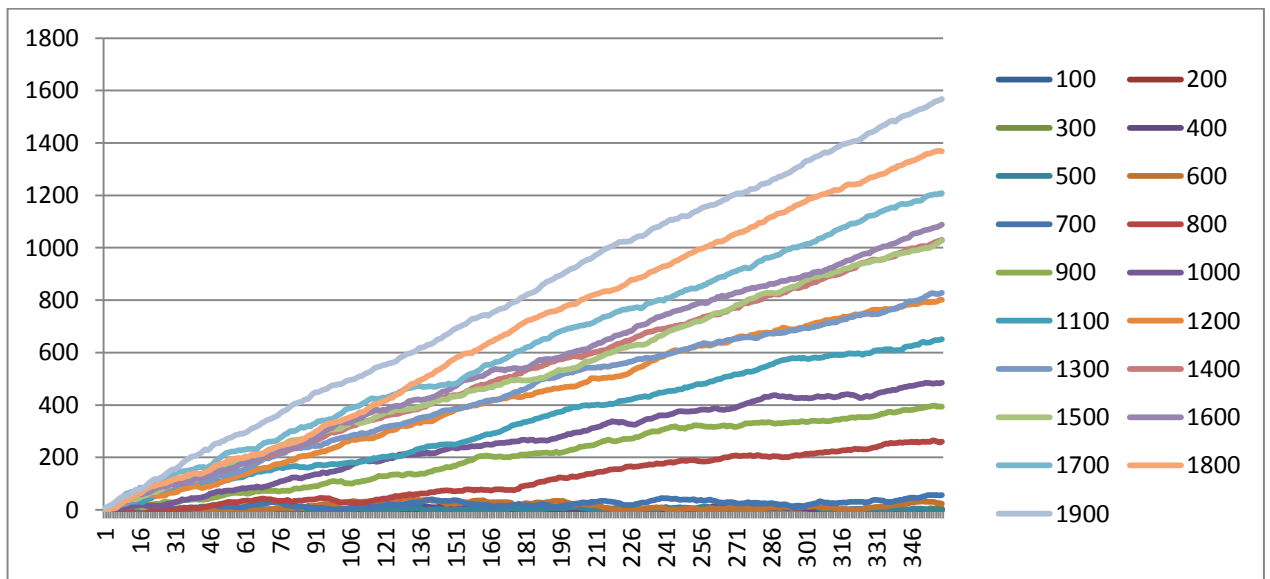


Рисунок В.32 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом пересечении на правом повороте при интенсивности 2000 авт./ч главной дороги

Результаты имитационного моделирования для нерегулируемого левоповоротного съезда представлены на рисунках В.33-В.40:

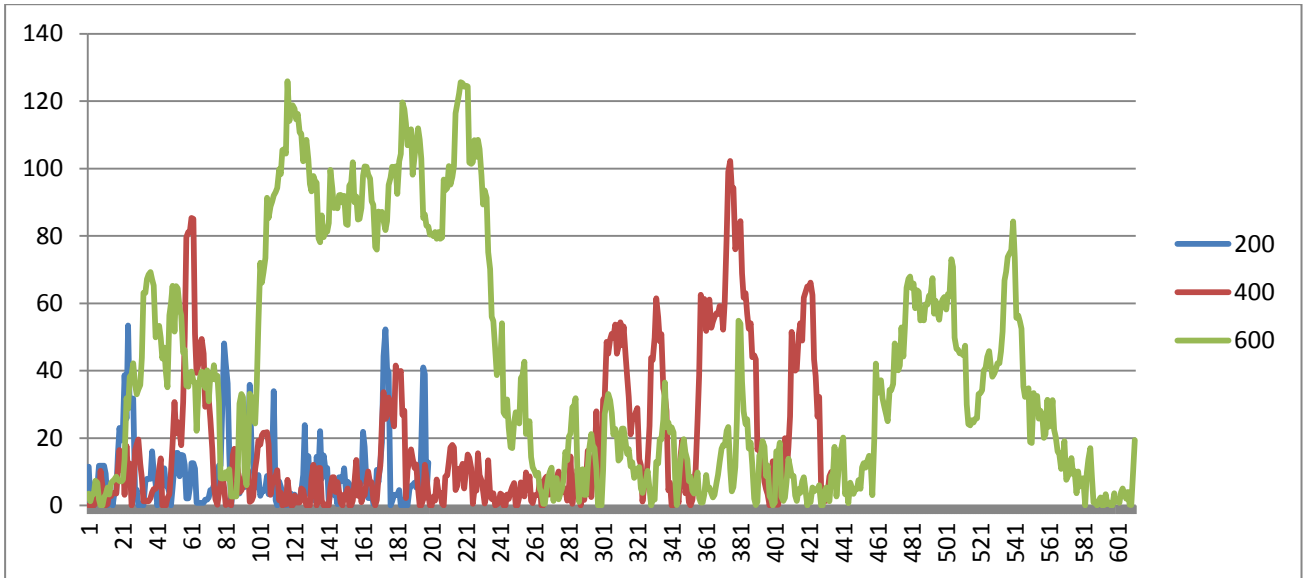


Рисунок В.33 – Задержка транспорта на нерегулируемого
левоповоротного съезда при интенсивности 600 авт./ч главной дороги

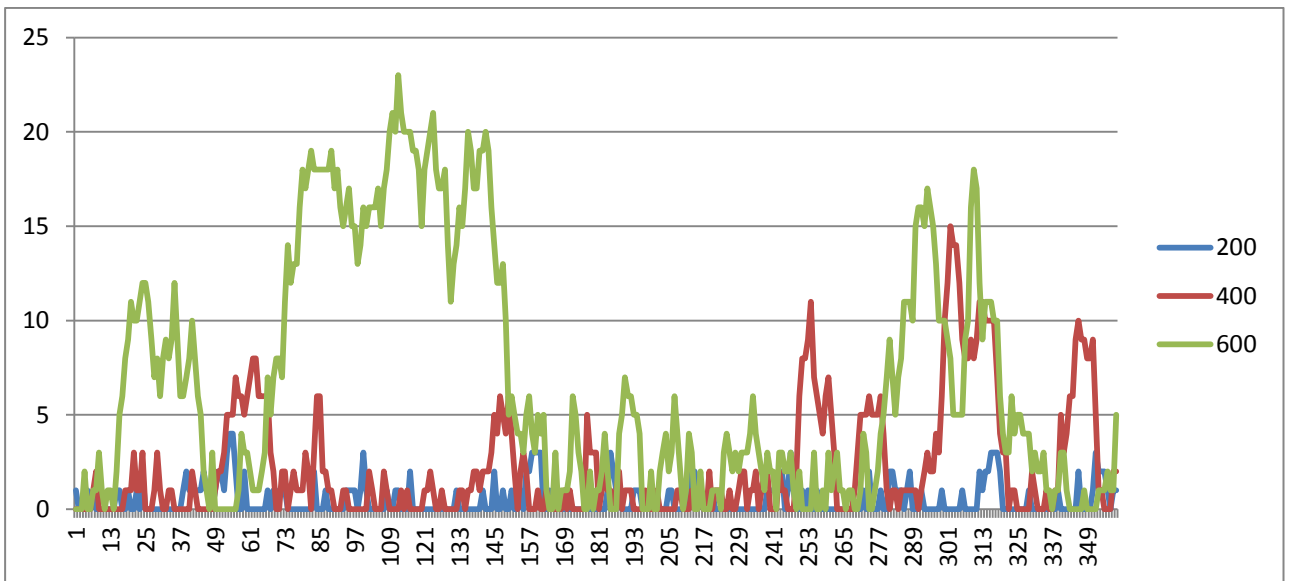


Рисунок В.34 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом
левоповоротном съезде при интенсивности 600 авт./ч
главной дороги

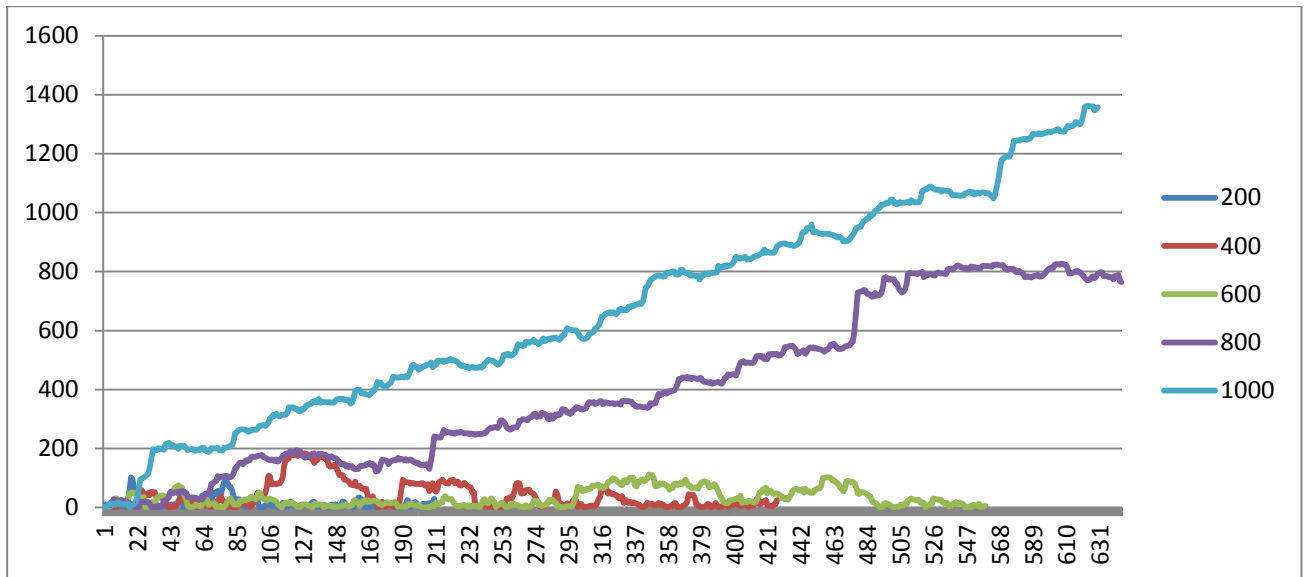


Рисунок В.35 – Задержка транспорта на нерегулируемого левоповоротного съезда при интенсивности 1000 авт./ч главной дороги

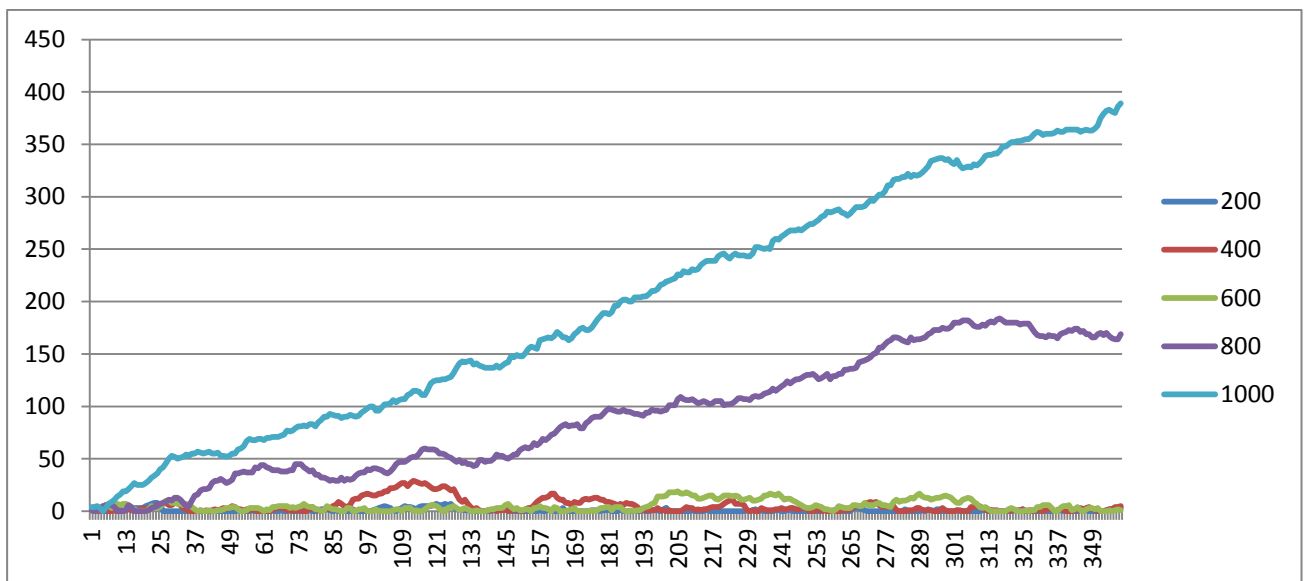


Рисунок В.36 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом левоповоротном съезде при интенсивности 1000 авт./ч главной дороги

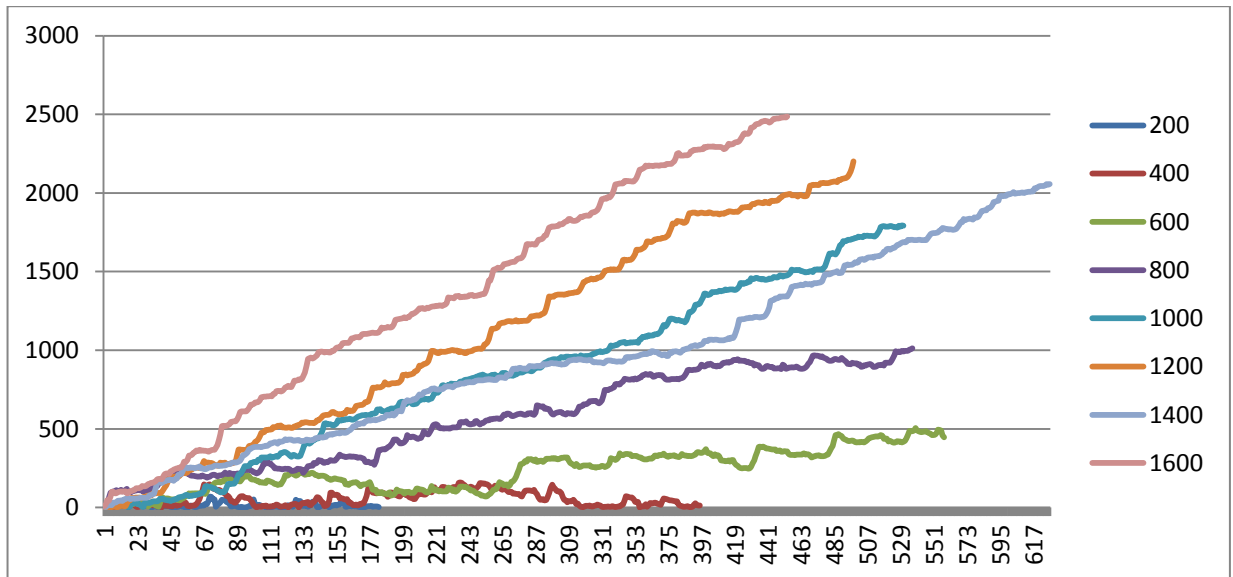


Рисунок В.37 – Задержка транспорта на нерегулируемого левоповоротного съезда при интенсивности 1600 авт./ч главной дороги

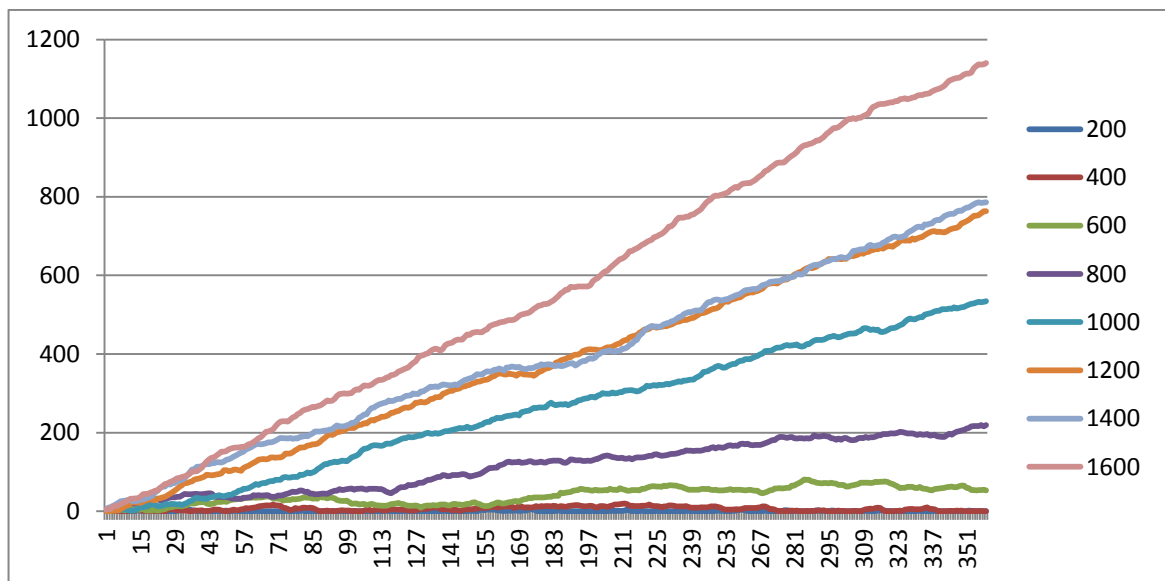


Рисунок В.38 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом левоповоротном съезде при интенсивности 1600 авт./ч главной дороги

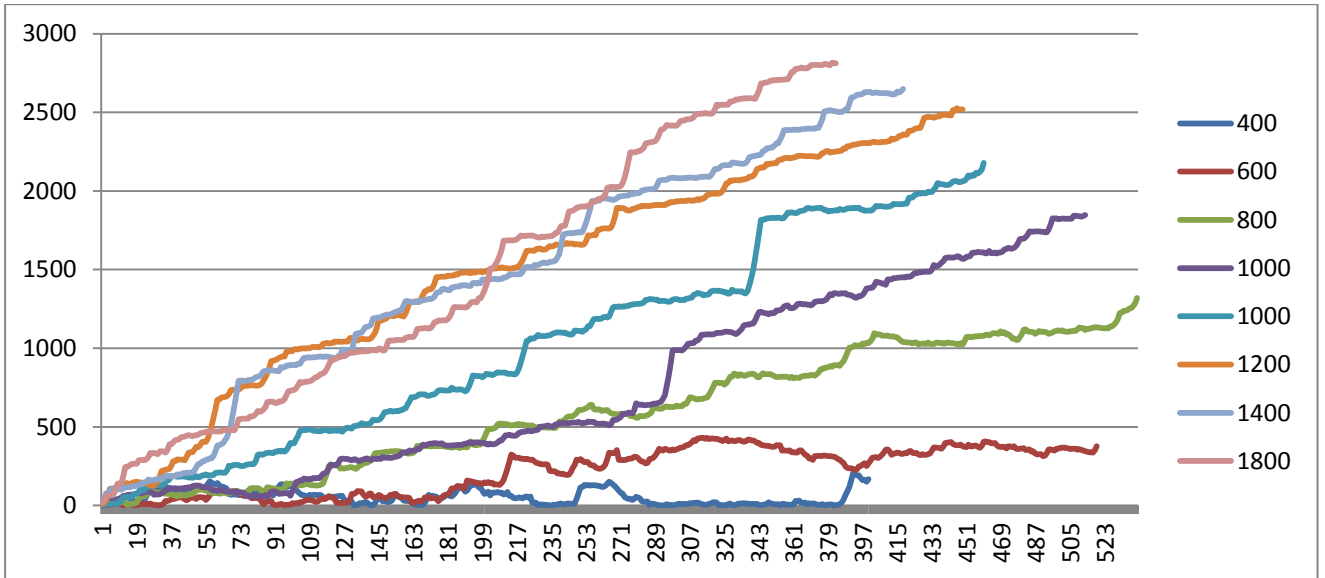


Рисунок В.39 – Задержка транспорта на нерегулируемого левоповоротного съезда при интенсивности 2000 авт./ч главной дороги

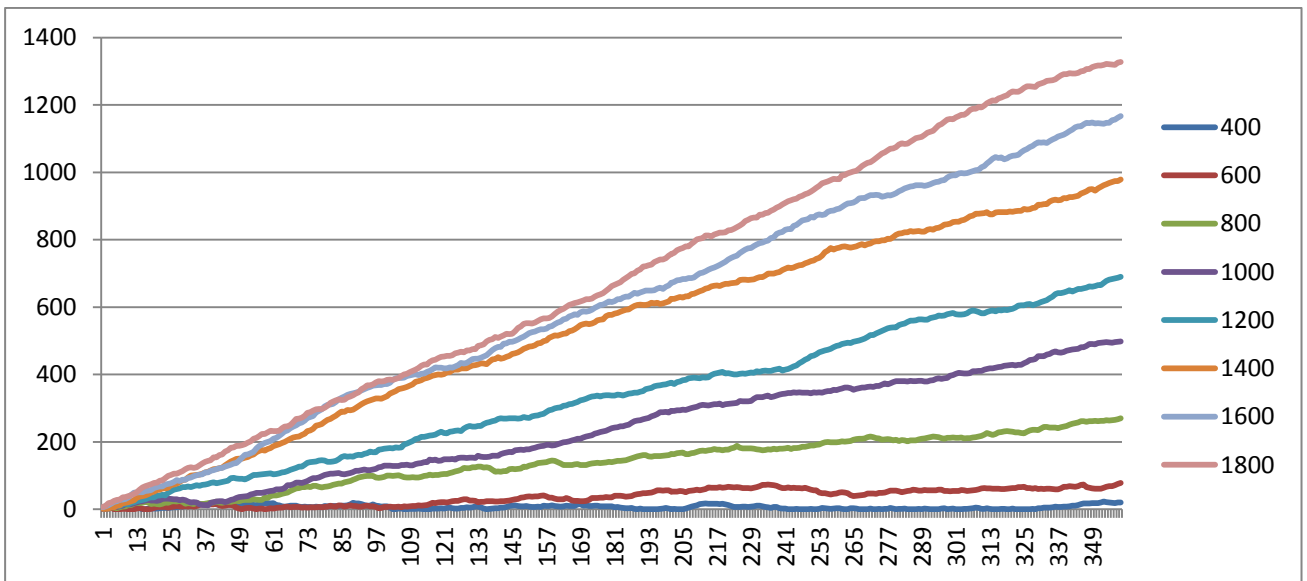


Рисунок В.40 – Количество автомобилей в очереди на нерегулируемом левоповоротном съезде при интенсивности 2000 авт./ч главной дороги